

Министерство образования и науки Российской Федерации

Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет

Кафедра транспортно-технологических машин

Б. С. ДОБРОБОРСКИЙ

БЕЗОПАСНОСТЬ МАШИН И ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ФАКТОР

Монография

Под редакцией д-ра техн. наук, профессора С. А. Волкова

Санкт-Петербург
2011

УДК 536; 614.8.084; 69.002.5.

Рецензенты: канд. физ-мат наук, доцент И.И.Хинич (ГОУ ВПО «Российский государственный педагогический университет им. А.И.Герцена»); канд. мед. наук, доцент Е.Н.Кадыкина (Санкт-Петербургская медицинская академия им. И.И.Мечникова)

Доброборский, Б. С.

Безопасность машин и человеческий фактор / Б.С. Доброборский под ред. д-ра техн. наук, проф. С.А.Волкова; СПбГАСУ. - СПб., 2011. - с.

В книге рассмотрены основные существующие принципы обеспечения безопасности машин, определены причины их низкой эффективности. Проведен анализ природы, законов функционирования и методов количественной оценки человеческого фактора с позиций термодинамики биологических систем и его учет при конструировании и эксплуатации различных машин и оборудования с целью повышения безопасности и улучшения условий труда.

Введение

Каждый день средства массовой информации сообщают о многочисленных техногенных авариях и катастрофах, происходящих во всем мире.

Постоянно происходят аварии на шахтах, разбиваются самолеты, происходят пожары.

По информации Health Organization ежегодно в мире только в результате дорожно-транспортных происшествий погибает 1.2 млн. человек.

Как показывает статистика, в подавляющем большинстве случаев (до 98%) виновниками этих событий являются люди, так или иначе нарушающих различные стандарты и правила по охране труда и технике безопасности.

В большинстве стран мира, в том числе и в Российской Федерации, к соответствующим работам, управлению транспортными средствами и другими машинами допускаются люди, обладающие соответствующей квалификацией и прошедшие необходимую подготовку в части охраны труда и техники безопасности.

За нарушение требований нормативных документов, а особенно в случаях, приведших к авариям с большим материальным ущербом и человеческими жертвами, законодательством предусмотрены соответствующие серьезные наказания, вплоть до уголовной ответственности.

Однако, как свидетельствует статистика, приведенные меры по обеспечению безопасности остаются малоэффективными.

По мнению автора, низкая эффективность существующих мер связана с тем, что они практически не учитывают биологическую природу человека, закономерности которой принципиально отличаются от законов функционирования машин.

В предлагаемой читателям книге изложены законы и принципы функционирования организма человека, основанные на физических законах природы, а так же методы их объективной количественной оценки, учет которых при проектировании машин, разработке технологических процессов и организации работ должен обеспечить значительное снижение вероятности аварий и катастроф.

Глава 1. Современные принципы оценки условий и безопасности труда

1.1. Человеческий фактор как источник повышенной опасности

Одна из первых попыток раскрыть содержание понятия «Человеческие факторы» была предпринята в 1930 году советским учёным Н. М. Добротворским, хотя сам термин был сформулирован позднее как результат перевода и сокращения выражения «human factors engineering» (буквально — техника человеческих факторов), используемого в США для обозначения как отрасли знаний, так и процесса проектирования систем «человек — машина» с

целью обеспечения эффективности, надёжности и безопасности деятельности человека или группы людей.

В 1957 году в США было образовано Общество человеческих факторов, а в 1958 году началось издание журнала «Человеческие факторы».

В европейских странах, в том числе в Российской Федерации, для обозначения специальной области знания и сферы профессиональной деятельности, аналогичной той, которую в США называют «Человеческие факторы», принят термин эргономика.

В настоящее время термин «человеческий фактор», благодаря неоднозначности его определения, широко используется учеными и специалистами применительно к самым разным случаям: при разработке условий жизнедеятельности человека, в исследованиях рисков из-за ошибочных решений и действий человека в экономике, политике, производстве, при конструировании рабочих мест машин и в других сферах человеческой деятельности.

Учёт человеческого фактора является неотъемлемой частью проектирования, создания и эксплуатации машин и технических систем, необходимым условием повышения производительности труда и качества продукции. Наиболее полно такой учёт осуществляется при проектировании деятельности человека в системах «человек - машина».

При проектировании конкретного вида деятельности проводится исследование свойств организма человека и его квалификации с последующим учетом и согласованием полученных данных с внешними средствами (документами, алгоритмами, инструментами, органами ручного управления и т.д.) в соответствии с основной целью функционирования создаваемой системы. На основе разработанного проекта формируют требования к техническим средствам системы, которые используются человеком для осуществления этого вида деятельности.

Поскольку содержание термина «человеческий фактор» до настоящего времени однозначно не определено, в настоящей работе под этим термином понимаются осознанные или случайные ошибочные решения или действия человека, вызванные особенностями его биологической природы и условиями его взаимодействия с внешней средой.

Проблема человеческого фактора существует в связи с тем, что организм человека, который непосредственно в той или иной степени участвует в решении тех или иных задач в различных областях человеческой деятельности, благодаря своей биологической природе обладает целым рядом специфических свойств, как полезных, так и вредных.

К полезным следует отнести такие свойства, как фенотипическая адаптация, обучаемость, приобретение новых навыков, изобретательность, изменение физических параметров, концентрация внимания и т.д.

К вредным следует отнести такие свойства, как быстрое наступление усталости, случайная кратковременная или долговременная потеря информации, совершение случайных ошибок, ошибочная оценка, нераспознавание или непонимание поступающей информации, принятие

заведомо неправильных и непредсказуемых решений, совершение заведомо неправильных и непредсказуемых действий и так далее.

Именно в результате перечисленных вредных свойств организма человека и происходят, несмотря на наличие большого числа различных нормативных документов и инструкций, несчастные случаи, аварии и катастрофы.

Например, по данным информационного агентства «REGNUM», опубликованным 10 февраля 2009 года, на шахтах Донбасса за неделю инспекторы Территориального управления Госгорпромнадзора выявили 7447 нарушений актов об охране труда, по данным ГИБДД нарушения правил дорожного движения имеют массовый характер, в результате чего только в Российской Федерации ежегодно погибает более 26 тысяч человек, информационными агентствами постоянно сообщается о многочисленных несчастных случаях в строительстве и других отраслях экономики.

В табл. 1.1 представлены данные Института машиноведения им. А.А.Благонравова РАН о значимости человеческого фактора в техногенных катастрофах.

Таблица 1.1

Коэффициент k_N значимости человеческого фактора

№	Области техносферы	k_N
1	Атомная энергетика	0,55
2	Промышленное и гражданское строительство	0,70
3	Ракетно-космическая техника	0,35
4	Военная авиация	0,85
5	Гражданская авиация	0,65
6	Трубопроводный транспорт	0,30
7	Автомобильный транспорт	0,80
8	Технологическое оборудование	0,40

Как видно из табл. 1.1, коэффициент значимости человеческого фактора k_N для важнейших отраслей промышленности имеет весьма большое значение. В частности, для автомобильного транспорта он составляет 0.80 – второе значение после военной авиации, а для промышленного и гражданского строительства 0,70.

Для уменьшения значимости человеческого фактора и соответственно уменьшения вероятности несчастных случаев, аварий и катастроф, во всех странах мира действуют различные нормативные документы, регламентирующие параметры машин и условий труда, вредно воздействующие на организм человека и провоцирующие возможность этих событий.

В Российской Федерации существует пять групп нормативных документов, направленных на обеспечение безопасных условий труда.

К ним относятся:

- гигиенические нормативные документы;
 - система стандартов безопасности труда;
 - система эргономических стандартов;
 - технические регламенты;
 - отраслевые и производственные инструкции по технике безопасности.
- Рассмотрим содержание этих документов.

1.2. Принципы гигиенического нормирования

Исторически наука об охране и безопасности труда сформировалась в 19-м веке по мере развития промышленности.

В 1890 году на конференции в Берлине представители пятнадцати государств приняли первые международные нормы по гигиене труда. Стали создаваться национальные и международные научные центры, специализирующие в области гигиены и охраны труда.

Наибольшие успехи в этой области были достигнуты во второй половине 20-го века в связи с бурным развитием радиоэлектроники и созданием широкого спектра приборов технического и медицинского назначения. Наличие этих приборов позволило выявлять и измерять как технические характеристики машин, так и реакции на эти характеристики организма человека.

В то же время производились поиски способов объективных количественных оценок этих реакций и таких параметров труда, как тяжесть и напряженность, составлялись различные таблицы энергозатрат человека, а также различные системы баллов и другие способы.

Одной из первых попыток количественной оценки воздействия нагрузок на организм человека предпринял выдающийся немецкий ученый Г. Леман, которым совместно с Э. Ацлером в Берлине был создан институт физиологии труда, перенесенный затем в Дортмунд.

В своей книге «Практическая физиология труда» Г. Леман опубликовал разработанные им системы баллов, позволяющих ориентировочно количественно оценить те или иные воздействия на организм человека различных нагрузок.

В результате многолетних исследований воздействия на организм человека различных факторов окружающей среды, быта и труда, были определены и регламентированы факторы, вредно воздействующие на него.

В настоящее время к таким факторам относятся следующие:

- **физические факторы** - температура, влажность, скорость движения воздуха, тепловое излучение; неионизирующие электромагнитные поля (ЭМП) и излучения - электростатическое поле; постоянное магнитное поле (в т.ч. гипогеомагнитное); электрические и магнитные поля промышленной частоты (50 Гц); широкополосные ЭМП, создаваемые ПЭВМ; электромагнитные излучения радиочастотного диапазона; широкополосные электромагнитные импульсы; электромагнитные излучения оптического диапазона (в т.ч. лазерное и ультрафиолетовое); ионизирующие излучения; производственный шум, ультразвук, инфразвук; вибрация (локальная, общая); аэрозоли (пыли)

преимущественно фиброгенного действия; освещение - естественное (отсутствие или недостаточность), искусственное (недостаточная освещенность, пульсация освещенности, избыточная яркость, высокая неравномерность распределения яркости, прямая и отраженная слепящая блесткость); электрически заряженные частицы воздуха - аэроионы;

- химические факторы - химические вещества, смеси, в т.ч. некоторые вещества биологической природы (антибиотики, витамины, гормоны, ферменты, белковые препараты), получаемые химическим синтезом и/или для контроля которых используют методы химического анализа;

- биологические факторы - микроорганизмы-продуценты, живые клетки и споры, содержащиеся в бактериальных препаратах, патогенные микроорганизмы - возбудители инфекционных заболеваний;

- факторы трудового процесса.

Тяжесть труда - характеристика трудового процесса, отражающая преимущественную нагрузку на опорно-двигательный аппарат и функциональные системы организма (сердечно-сосудистую, дыхательную и др.), обеспечивающие его деятельность.

Тяжесть труда характеризуется физической динамической нагрузкой, массой поднимаемого и перемещаемого груза, общим числом стереотипных рабочих движений, величиной статической нагрузки, характером рабочей позы, глубиной и частотой наклона корпуса, перемещениями в пространстве.

Напряженность труда - характеристика трудового процесса, отражающая нагрузку преимущественно на центральную нервную систему, органы чувств, эмоциональную сферу работника.

К факторам, характеризующим напряженность труда, относятся: интеллектуальные, сенсорные, эмоциональные нагрузки, степень монотонности нагрузок, режим работы.

Предельно-допустимые значения перечисленных факторов, при которых должен обеспечиваться необходимый уровень безопасности труда, регламентированы рядом действующих в Российской Федерации и других странах нормативных документов, среди которых основным является гигиеническое нормирование.

Другие нормативные документы: системы стандартов безопасности труда и технические регламенты в гигиенической части лишь повторяют содержание этих документов либо ссылаются на них.

Действующими нормативными документами даются следующие определения содержания гигиенического нормирования:

Гигиеническое нормирование заключается в установлении пределов интенсивности и продолжительности воздействия на организм человека факторов окружающей среды.

Гигиенические нормы представляют собой гигиенические критерии оценки факторов рабочей среды, тяжести и напряженности трудового процесса и гигиеническую классификацию условий труда по показателям вредности и опасности.

Принципы гигиенического нормирования основаны на дифференциации гигиенических критериев - показателей, характеризующих степень отклонений каждого из параметров факторов рабочей среды и трудового процесса от действующих гигиенических нормативов и анализе эффектов, оказываемых ими на организм человека.

Содержанием этого анализа является регистрация тех или иных изменений в состоянии организма человека при воздействии различных доз тех или иных нагрузок, как по уровню, так и по времени.

Установление нормативов основывается на концепции пороговости воздействия. Порог вредного действия - это тот минимальный уровень интенсивности и продолжительности воздействия на организм человека фактора окружающей среды, при воздействии которого в организме возникают изменения, выходящие за пределы физиологических и приспособительных реакций, или скрытая (временно компенсированная) патология.

Пороговое действие вызывает у организма человека реакцию - функциональный сдвиг, который не может быть скомпенсирован за счет гомеостатических механизмов (механизмов поддержания внутреннего равновесия организма). Как будет показано ниже, это утверждение ошибочно.

Опасный фактор рабочей среды - фактор среды и трудового процесса, который может быть причиной острого заболевания или внезапного резкого ухудшения здоровья, смерти. В зависимости от количественной характеристики и продолжительности действия отдельные вредные факторы рабочей среды могут стать опасными для здоровья.

Для их оценки нормативными документами предусмотрено их условное подразделение на 4 класса: оптимальные, допустимые, вредные и опасные.

Оптимальные условия труда (1 класс) - условия, при которых сохраняется здоровье работника и создаются предпосылки для поддержания высокого уровня работоспособности.

Оптимальные нормативы факторов рабочей среды установлены для микроклиматических параметров и факторов трудовой нагрузки.

Для других факторов за оптимальные условно принимают такие условия труда, при которых вредные факторы отсутствуют либо не превышают уровни, принятые в качестве безопасных для населения.

Допустимые условия труда (2 класс) характеризуются такими уровнями факторов среды и трудового процесса, которые не превышают установленных гигиенических нормативов для рабочих мест.

В случае возможных изменений функционального состояния организма они восстанавливаются во время регламентированного отдыха или к началу следующей смены.

Такие условия труда не оказывают неблагоприятного действия в ближайшем и отдаленном периоде на состояние здоровья работников и их потомство.

Допустимые условия труда условно относят к безопасным.

Здесь необходимо иметь в виду, что живые организмы имеют очень большие разбросы физиологических параметров, так что работа в допустимых условиях не дает полную гарантию от их неблагоприятного воздействия.

В табл. 1.2, 1.3 и 1.4 приведены примеры классификации условий труда в зависимости от уровней шума, локальной и общей вибрации на рабочем месте, классы условий труда по показателям тяжести трудового процесса и классы условий труда по показателям напряженности трудового процесса.

Таблица 1.2

Классы условий труда в зависимости от уровней шума, локальной и общей вибрации на рабочем месте

Название фактора, показатель, единица измерения	Класс условий труда					
	Допустимый	Вредный				Опасный
	2	3.1	3.2	3.3	3.4	4
	Превышение ПДУ до ____ дБ/раз (включительно):					
Шум, эквивалентный уровень звука, дБА	<= ПДУ <1>	5	15	25	35	> 35
Вибрация локальная, эквивалентный скорректированный уровень (значение) виброскорости, виброускорения (дБ/раз)	<= ПДУ <2>	3/1,4	6/2	9/2,8	12/4	> 12/4
Вибрация общая, эквивалентный скорректированный уровень виброскорости, виброускорения (дБ/раз)	<= ПДУ <2>	6/2	12/4	18/6	24/8	> 24/8
<1> В соответствии с санитарными нормами СН 2.2.4/2.1.8.562-96 "Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки". <2> В соответствии с санитарными нормами СН 2.2.4/2.1.8.566-96 "Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий".						

Таблица 1.3

Классы условий труда по показателям тяжести трудового процесса

Показатели тяжести трудового процесса	Классы условий труда			
	Оптимальный (легкая физическая нагрузка)	Допустимый (средняя физическая нагрузка)	Вредный тяжелый труд	
			1 степени	2 степени
	1	2	3.1	3.2
1	2	3	4	5
Физическая динамическая нагрузка (единицы внешней механической работы за смену, кг · м)				
1.1. При региональной нагрузке (с преимущественным участием мышц рук и плечевого пояса) при перемещении груза на расстояние до 1 м:				
для мужчин	до 2500	до 5000	до 7000	> 7000
для женщин	до 1500	до 3000	до 4000	> 4000
При общей нагрузке (с участием мышц рук, корпуса, ног):				
1.2.1 При перемещении груза на расстояние от 1 до 5 м:				
для мужчин	до 12500	до 25000	до 35000	более 35000
для женщин	до 7500	до 15000	до 25000	более 25000

Таблица 1.4

Классы условий труда по показателям напряженности трудового процесса

Показатели напряженности трудового процесса	Класс условий труда			
	Оптимальный	Допустимый	Вредный	
	Напряженность труда легкой степени	Напряженность труда средней степени	Напряженный труд	
			1 степени	2 степени
	1	2	3.1	3.2
1. Интеллектуальные нагрузки				
1.1. Содержание работы	Отсутствует необходимость принятия решения	Решение простых задач по инструкции	Решение сложных задач с выбором по известным алгоритмам (работа по серии инструкций)	Эвристическая (творческая) деятельность, требующая решения алгоритма, единоличное руководство в сложных ситуациях
2. Сенсорные нагрузки				
2.1. Длительность сосредоточенного наблюдения (% времени смены)	До 25	26 – 50	51 – 75	Более 75
2.2. Плотность сигналов (световых, звуковых)	До 75	76 – 175	176 – 300	Более 300
3. Эмоциональные нагрузки				
3.1. Степень ответственности и за результат собственной деятельности. Значимость ошибки	Несет ответственность за выполнение отдельных элементов заданий. Влечет за собой дополнительные усилия в работе со стороны работника	Несет ответственность за функциональное качество вспомогательных работ (заданий). Влечет за собой дополнительные усилия со стороны вышестоящего руководства (бригадира, мастера и т.п.)	Несет ответственность за функциональное качество основной работы (заданий). Влечет за собой исправления за счет дополнительных усилий всего коллектива (группы, бригады и т.п.)	Несет ответственность за функциональное качество продукции, работы, задания. Влечет за собой повреждение оборудования, остановку технологического процесса и может возникнуть опасность для жизни

Конечным результатом гигиенической оценки является определение вредности и опасности труда, которое производится по результатам классификации исследованных показателей по следующим правилам.

Условия труда на рабочем месте отвечают гигиеническим требованиям и относятся к 1 или 2 классу, если фактические значения уровней вредных факторов находятся в пределах оптимальных или допустимых величин соответственно. Если уровень хотя бы одного фактора превышает допустимую величину, то условия труда на таком рабочем месте, в зависимости от величины превышения и в соответствии с указанным выше Руководством, как по отдельному фактору, так и при их сочетании, могут быть отнесены к 1 - 4 степеням 3 класса вредных или 4 классу опасных условий труда.

Для установления класса условий труда превышения ПДК, ПДУ могут быть зарегистрированы в течение одной смены, если она типична для данного технологического процесса.

При нетипичном или эпизодическом (в течение недели, месяца) воздействии оценку условий труда проводят по эквивалентной экспозиции и/или максимальному уровню фактора, а в сложных случаях по согласованию с территориальными управлениями Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека.

Оценка условий труда с учетом комбинированного действия факторов проводится на основании результатов измерений отдельных факторов и в соответствии с п. п. 5.1 - 5.10, в которых учтены эффекты суммации при комбинированном действии химических веществ, биологических факторов, различных частотных диапазонов электромагнитных излучений.

Общую оценку устанавливают:

- по наиболее высокому классу и степени вредности;
- в случае сочетанного действия 3 и более факторов, относящихся к классу 3.1, общая оценка условий труда соответствует классу 3.2;
- при сочетании 2-х и более факторов классов 3.2, 3.3, 3.4 - условия труда оцениваются соответственно на одну степень выше.

В результате заполняется итоговая таблица по оценке условий труда работника по степени вредности и опасности, в которую вносятся данные по вредности и опасности каждого фактора и итоговая оценка.

Как видно из приведенных материалов, оценка воздействия источников нагрузок производится посредством условных единиц – классов, не имеющих метрологического обоснования.

Причем сами принципы гигиенического нормирования основаны на дифференциации гигиенических критериев, что так же ничем не обосновано, так как рабочие места всегда характеризуются большим комплексом разнообразных параметров.

В качестве примеров можно привести такие, как рабочая поза, освещение, монотонность труда и многими другими, воздействующих одновременно и часто характеризующихся потенцирующим взаимодействием на организм человека.

Таким образом, определение условий труда по показателям напряженности трудового процесса практически не содержит каких-либо реальных критериев для их количественной оценки.

1.3. Система стандартов безопасности труда

Система стандартов безопасности труда - ССБТ представляет собой комплекс взаимосвязанных стандартов, содержащих требования, нормы и правила, направленные на обеспечение безопасности, сохранение здоровья и работоспособности человека в процессе труда, кроме вопросов, регулируемых трудовым законодательством.

Требования, установленные стандартами ССБТ в соответствии с областью их распространения, должны быть учтены в стандартах и технических условиях, в нормативно-технической, а также в конструкторской, технологической и проектной документации.

ССБТ включает группы, приведенные в табл. 1.5.

Таблица 1.5.

Группы стандартов ССБТ

Шифр группы	Наименование группы
0	Организационно-методические стандарты
1	Стандарты требований и норм по видам опасных и вредных производственных факторов
2	Стандарты требований безопасности к производственному оборудованию
3	Стандарты требований безопасности к производственным процессам
4	Стандарты требований к средствам защиты работающих

Стандарты группы «0» устанавливают:

- организационно-методические основы стандартизации в области безопасности труда (цели, задачи и структура системы: внедрение и контроль за соблюдением стандартов ССБТ, терминология в области безопасности труда, классификация опасных и вредных производственных факторов и др.);
- требования (правила) к организации работ, направленных на обеспечение безопасности труда (обучение работающих безопасности труда, аттестация персонала, методы оценки состояния безопасности труда и др.).

Стандарты группы «1» устанавливают:

- требования по видам опасных и вредных производственных факторов, предельно допустимые значения их параметров и характеристик;
- методы контроля нормируемых параметров и характеристик опасных и вредных производственных факторов;
- методы защиты работающих от опасных и вредных производственных факторов.

Стандарты группы «2» устанавливают:

- общие требования безопасности к производственному оборудованию;
- требования безопасности к отдельным группам (видам) производственного оборудования;

- методы контроля выполнения требований безопасности.

Стандарты группы «3» устанавливают:

- общие требования безопасности к производственным процессам;
- требования безопасности к отдельным группам (видам)

технологических процессов;

- методы контроля выполнения требований безопасности.

Стандарты группы «4» устанавливают:

- требования к отдельным классам, видам и типам средств защиты;
- методы контроля и оценки средств защиты;
- классификацию средств защиты.

Объектами стандартизации ССБТ являются правила, нормы и требования, направленные на обеспечение безопасности труда:

- 1) основные положения системы стандартов безопасности труда;
- 2) метрологическое обеспечение безопасности труда;
- 3) классификация опасных и вредных производственных факторов;
- 4) термины и определения основных понятий в области безопасности труда;
- 5) общие требования безопасности по видам опасных и вредных производственных факторов (общие требования электробезопасности, пожаро- и взрывобезопасности и др.), а также методы защиты работающих от этих факторов;
- 6) методы контроля нормируемых параметров опасных и вредных производственных факторов;
- 7) предельно допустимые значения параметров опасных и вредных производственных факторов.
- 8) общие требования безопасности к производственному оборудованию и к группам производственного оборудования, а также методы контроля и оценки выполнения требований безопасности;
- 9) общие требования безопасности к комплексам производственного оборудования, работающим в автоматическом и/или полуавтоматическом режимах, и методы контроля;
- 10) общие требования безопасности к производственным процессам и видам технологических процессов, а также методы контроля выполнения требований безопасности;
- 11) классификация средств защиты работающих;
- 12) общие технические требования к классам и видам средств защиты работающих;
- 13) методы контроля и оценки защитных и гигиенических свойств средств защиты работающих;
- 14) номенклатура показателей качества классов и видов средств защиты работающих;
- 15) общие требования к маркировке средств защиты работающих;
- 16) требования к цветам и знакам безопасности.

Система стандартов ССБТ охватывает широкий круг вопросов, связанных с безопасностью труда, однако предельно допустимые значения параметров

опасных и вредных производственных факторов на рабочих местах устанавливаются в стандартах ССБТ по нормам, утвержденным Министерством здравоохранения и социального развития РФ.

1.4. Принципы эргономических требований и эргономического обеспечения

Эргономика (от греческих: *ergon* - работа и *nomos* - закон) - это наука, изучающая человека в условиях производства с целью оптимизации условий труда, орудий труда и т.п., учитывая при этом такие науки, как антропологию, физиологию, психологию и другие.

Первое использование термина "эргономика" принадлежит польскому ученому В. Ястржебовскому (1857).

Первые исследования, непосредственно связанных с момента создания эргономики начались в начале 1920-х годов, когда физиологи, психологи, врачи, и инженеры в Великобритании, США, Японии и некоторых других стран начали совместные исследования человека с целью максимального использования его физических и психологических возможностей и дальнейшей интенсификации труда.

Термин «эргономика» стал широко применяться после, где эргономика рассматривалась как независимая научная дисциплина.

Как дисциплина, эргономика возникла в годы второй мировой войны, когда возросла роль воздействия человека на управление все более усложняющимися военными системами. После войны развитие эргономики продолжилось в интересах решения задач гражданского характера.

В 1945 г. было создано первое общество профессиональных эргономистов в Великобритании, в 1949 г. группа британских ученых, возглавляемых К. Мюррелом, организовала Общество исследования эргономики, а в 1959 г. была основана Международная эргономическая ассоциация (МЭА) для удовлетворения потребности в международном сотрудничестве, главным образом в Европе.

В результате дальнейших работ в ряде стран, в том числе и в СССР, была разработана система стандартов эргономических требований и эргономического обеспечения (входящих в состав системы стандартов безопасности труда и стандарты ИСО).

Этими стандартами в основном определяются требования к организации рабочих мест, геометрическим параметрам пультов управления, видеоконтрольных и других устройств.

Например, в ГОСТе 22269-76. Система человек – машина». «Рабочее место оператора. Взаимное расположение элементов рабочего места», изложены следующие требования к размещению органов управления:

- органы управления должны располагаться в зоне досягаемости моторного поля;
- наиболее важные и часто используемые органы управления должны быть расположены в зоне легкой досягаемости моторного поля;

- органы управления, связанные с определенной последовательностью действий оператора, должны группироваться таким образом, чтобы действия оператора осуществлялись слева направо и сверху вниз;
- расположение функционально идентичных органов управления должно быть единообразным на всех панелях рабочего места;
- расположение органов управления должно обеспечить равномерность нагрузки обеих рук и ног человека-оператора.

На рис. 1.1 показано одно из первых эргономических требований к рабочему месту оператора ПЭВМ

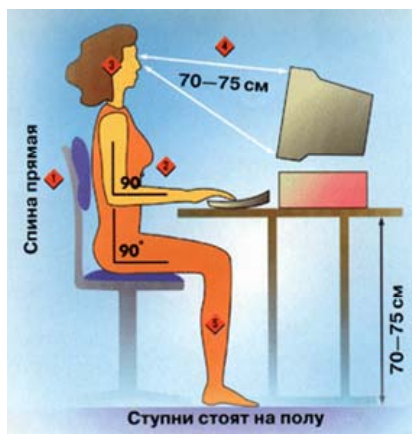


Рис. 1.1. Одни из первых эргономических требований к рабочему месту оператора ПЭВМ

Таким образом, эргономические стандарты регламентируют требования к рабочим местам лишь в самом общем виде.

1.5. Анализ технических регламентов

Для обеспечения безопасности продукции в Российской Федерации в 2002 году был принят закон «О техническом регулировании».

Этот закон регулирует отношения, возникающие при: разработке, принятии, применении и исполнении обязательных требований к продукции или к связанным с ними процессам проектирования (включая изыскания), производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации;

Под термином «Техническое регулирование» понимается правовое регулирование отношений в области установления, применения и исполнения обязательных требований к продукции или к связанным с ними процессам проектирования (включая изыскания), производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, а также в области установления и применения на добровольной основе требований к продукции, процессам проектирования (включая изыскания), производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, выполнению работ или оказанию услуг и правовое регулирование отношений в области оценки соответствия.

Техническое регулирование осуществляется путем разработки и применения соответствующих технических регламентов.

Технический регламент - документ, который устанавливает обязательные для применения и исполнения требования к объектам технического регулирования (продукции, в том числе зданиям, строениям и сооружениям или к связанным с требованиями к продукции процессам проектирования (включая изыскания), производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации);

Техническими регламентами с учетом степени риска причинения вреда устанавливают минимально необходимые требования, обеспечивающие: безопасность излучений; биологическую безопасность; взрывобезопасность; механическую безопасность; пожарную безопасность; промышленную безопасность; термическую безопасность; химическую безопасность; электрическую безопасность; ядерную и радиационную безопасность; электромагнитную совместимость в части обеспечения безопасности работы приборов и оборудования; единство измерений и некоторые другие виды безопасности.

Таким образом, техническими регламентами устанавливают необходимые требования к техническим изделиям и технологиям, в результате которых обеспечивается безопасность их параметров с учетом соответствующего риска.

1.6. Проведение обучения, инструктажей по охране труда и обучения рабочих безопасным приемам труда

Проведение обучения, инструктажей по охране труда и обучения рабочих безопасным приемам труда в Российской Федерации является обязательным в соответствии с ГОСТом 12.0.004-90 «Система стандартов безопасности труда, организация обучения безопасности труда» и другими нормативными документами (строительными нормами и правилами, правилами эксплуатации электроустановок потребителей и другими).

Инструкции по технике безопасности на рабочих местах обычно разрабатываются сотрудниками предприятий – специалистами в области охраны труда и утверждаются руководителями предприятий в соответствии с указанными выше документами.

Эти инструкции предусматривают организацию рабочих мест и технологию работ с учетом специфики производства и наличия источников опасности. В связи с этим инструкции предназначаются для конкретных рабочих мест в условиях конкретных производств, например инструкция по охране труда для бригадира котельной, инструкция по охране труда для газосварщика, инструкция по охране труда для бетонщика и т.д.

В этих документах обычно указываются необходимые мероприятия для безопасной организации и выполнения работ (например, установка ограждений, проверка исправности и сроков проверки инструментов, проверка исправности и сроков метрологической аттестации измерительных приборов, вывешивание предупредительных табличек).

Как видно из приведенных материалов, действующие нормативные документы при условии их соблюдения должны безусловно обеспечить высокий уровень безопасности при выполнении практически любых работ.

Однако, как было указано выше, этого не происходит, практически независимо от мер ответственности. Повсеместно наблюдаются многочисленные нарушения правил техники безопасности, как осознанно, так и случайно.

Для определения причин такого положения необходимо выяснить, по каким причинам квалифицированные специалисты и большие руководители, прекрасно знающие свое дело и необходимые условия проведения безопасных работ, тем не менее, с невероятным риском для себя и других осознанно идут на грубейшие нарушения этих правил.

Для этого рассмотрим основные условия взаимодействия человека и машин.

1.7. Основные виды машин и их взаимодействие с оператором в системе «человек – машина»

1.7.1. Определение системы «человек – машина»

Одним из критериев развития человеческой цивилизации является создание и совершенствование орудий труда, позволивших расширить физические и умственные возможности человека в изготовлении предметов труда, необходимых для улучшения условий его жизнедеятельности.

Наиболее древними достижениями человеческой цивилизации стало изготовление и применение каменных орудий. Использование физических параметров этих орудий, в основном массы и формы, позволяло древним людям более эффективно использовать свои физические силы в процессе труда.

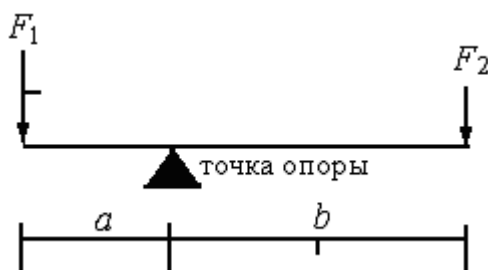


Рис.1.2. Рычаг Архимеда

a, b – плечи рычага; F_1, F_2 – силы, приложенные к концам плеч рычага

В качестве классического примера преобразования физических усилий человека для повышения эффективности его труда можно привести одно из гениальных изобретений человечества – рычаг Архимеда (рис. 1.2), в котором используется открытый Архимедом (287-212 г.г. до н.э.) закон обратной пропорциональной зависимости между соотношениями длин плеч рычага и приложенных к ним сил, представленный формулой (1.1):

$$\frac{a}{b} = \frac{F_2}{F_1}, \quad (1.1)$$

где: a, b - плечи рычага;

F_1, F_2 - силы, приложенные к концам плеч рычага.

Как следует из формулы (1.1), если длина правого плеча рычага b , например, в два раза больше левого a , то для равновесия сила F_1 должна быть в два раза больше силы F_2 .

Рассматривая производимую при этом работу A , отметим следующее.

Как известно, работа A представляет собой произведение силы F , воздействующей на некоторое тело, на путь перемещения этого тела s :

$$A = F \cdot s \quad (1.2)$$

Отсюда, выполняя одну и ту же работу, но применяя разные по соотношению длин плечи рычага, мы можем проигрывать в пути, но выигрывать в силе, либо наоборот. А поскольку, как правило, силы человека значительно ограничены, а путь мало ограничен, то используемый им рычаг в основном и применяется для выигрыша в силе за счет потерь в пути.

В общем случае орудия труда делятся на два вида:

- инструменты – орудия труда, в которых используется только энергия человека;

- машины – орудия труда, в которых в основном используются различные природные виды энергий: тепловая, электрическая, атомная и другие, а энергия человека применяется как дополнительная, в большинстве случаев осуществляющая функции ручного либо автоматизированного управления.

Взаимодействие человека с инструментами заключается в преобразовании отношений силы и пути при осуществляемой им физической работе для повышения эффективности труда.

Например, используя кувалду и зубило с заостренным концом, человек может расколоть огромные камни, так как энергия кувалды концентрируется на небольшой площади конца зубила, создавая на ней значительное давление; используя различные виды домкратов и лебедок, человек может поднимать и перемещать многотонные грузы и производить многие другие тяжелые работы.

Взаимодействие человека с машинами в основном заключается в управлении их работой, испытывая как физические, так и умственные нагрузки.

При своей работе машина может быть источником физических, химических и других факторов, оказывающих определенное вредное воздействие на организм человека.

Поэтому в ее конструкции всегда должны быть предусмотрены соответствующие меры, обеспечивающие безопасность такого воздействия.

Исходя из роли человека и машины в их совместном процессе производства предмета труда, определим понятие «система «человек-машина»:

Система «человек – машина» - система, содержащая человека и машину, в результате взаимодействия которых достигается соответствующий положительный эффект.

1.7.2. Основные параметры системы «человек – машина»

Назначением системы «человек - машина» является производство продукции. Поэтому основными параметрами этой системы следует считать:

- производительность, являющуюся результатом совокупного взаимодействия технических параметров машины и физиологических параметров человека,

- вероятность отказов машины и человека,

- вероятность ущерба в результате отказов.

Взаимодействие труда человека и работы машины может иметь самый разный характер, зависящий от роли и функций машины и роли человека в производственном и технологическом процессах изготовления продукции.

Это взаимодействие определяется:

Со стороны машины:

1. Назначением;
2. Конструкцией;
3. Техническими параметрами;
4. Технологическим процессом производства продукции;
5. Степенью соответствия параметров машины физиологическим

параметрам человека.

Со стороны человека:

1. Физическими возможностями;
2. Умственными возможностями;
3. Квалификацией;
4. Опыт работы.

В зависимости от назначения, конструкторских решений и используемых технологий степень приспособленности машин к физиологическим возможностям человека для выполнения им предусмотренных конструкцией машины операций может быть самой разной.

Рассмотрим случаи несоответствия, неполного соответствия и полного соответствия параметров машин физиологическим параметрам человека.

В качестве примера несоответствия машины физиологическим параметрам человека может быть приведен переносный пневматический перфоратор для бурения шпуров на карьерах и в шахтах.

При работе переносного пневматического перфоратора человек должен прикладывать значительные физические усилия по перестановке буровых штанг и переноске перфораторов, масса которых составляет до 52 кг и более, а так же и большие усилия подачи в процессе бурения.

На рис. 1.3 показан процесс бурения шпуров пневматическим переносным перфоратором в направлении вертикально вниз, на рис. 1.4 показан процесс бурения переносным пневматическим перфоратором горизонтальных и

наклонных шпуров с использованием пневмоподдержки, на рис. 1.5 график зависимости скорости бурения от усилия подачи.



Рис. 1.3.
Бурение переносным перфоратором вниз



Рис. 1.4.
Бурение переносным перфоратором на пневматической поддержке горизонтальных шпуров

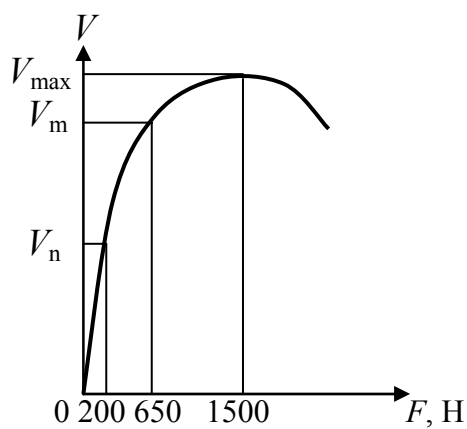


Рис. 1.5
График зависимости скорости бурения V от усилия подачи F

При бурении вниз усилие подачи обеспечивается массой перфоратора и усилием бурильщика. При горизонтальном и наклонном бурении пневмоподдержка, удерживая перфоратор в нужном положении уравниванием его массы, за счет ее наклона частично обеспечивает усилие подачи буровой штанги в направлении шпура. Здесь так же требуется усилие бурильщика. В соответствии с санитарными нормами максимальное усилие человека должно составлять не более 200 Н (Ньютон). Однако, как видно из графика зависимости скорости бурения V от усилия подачи F переносного перфоратора (рис. 1.5), при таком усилии скорость бурения V_n , а с учетом массы перфоратора при бурении вниз также и скорость бурения V_m будут значительно меньше максимальной V_{max} , достигаемой лишь при усилии $F=1700$ Н. Поэтому, для обеспечения высокой скорости бурения бурильщик должен прикладывать усилия, значительно превышающие допустимые. При этом он еще вынужден переносить сильный шум и вибрацию, дышать воздухом со значительным содержанием пыли и масляных аэрозолей, сопровождающих работу перфоратора.

1.7.3. Принципы взаимодействия человека с инструментами и машинами

Как было указано выше, взаимодействие человека с инструментами в основном заключается в преобразовании параметров осуществляемой человеком работы для достижения необходимого положительного эффекта.

В связи с большим разнообразием работ, выполняемых человеком, для эффективного использования его труда к настоящему времени разработаны тысячи различных специализированных инструментов, и интенсивная работа над улучшением их параметров продолжается и по настоящее время. В качестве примера можно привести такие рас-пространенные и на первый взгляд простые инструменты, как гаечные ключи.

Несмотря на одинаковый принцип их действия – усилие затягивания резьбовых соединений гаек и болтов физической силой человека за счет большой длины рычага, в зависимости от конкретных условий их использования необходимо применение ключей самых разных конструкций.

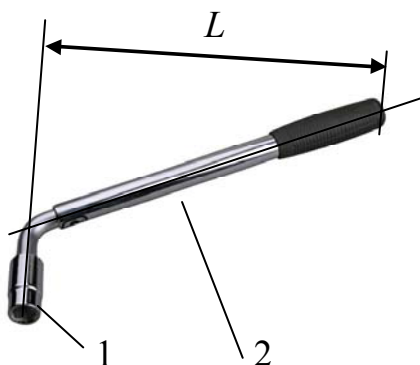


Рис.1.6. Баллонный гаечный ключ

К настоящему времени разработаны многочисленные виды гаечных ключей: баллонные, динамометрические, накидные, разводные, разрезные, рожковые, торцевые, трещеточные и так далее.

Правильный выбор типа гаечного ключа имеет чрезвычайно важное значение для оперативного и успешного выполнения необходимой операции при сравнительно легких условиях труда человека.

На рис. 1.6 в качестве примера представлена конструкция баллонного гаечного ключа, предназначенного для крепежа гаек или болтов дисков колес легковых автомобилей.

Как видно из рис. 1.6, баллонный гаечный ключ имеет сложную конструкцию, содержащую головку 1 и рукоятку 2, представляющую собой достаточно длинный рычаг с обрезиненной ручкой на конце.

Оси головки 1 и рукоятки 2 находятся под углом α , обеспечивающим возможность не задевать при его вращении диск колеса.

Длина рычага L выбрана такой, чтобы обеспечить необходимое усилие затягивания резьбового соединения физической силой человека.

Аналогичный подход осуществляется и при разработке других видов инструментов.

Как будет показано далее, основной задачей разработки и правильного использования инструментов является количественная оценка условий труда при их использовании, включающая необходимые усилия, рабочую позу, время выполнения операции и другие параметры.

1.7.4. Основные виды машин и их взаимодействия с человеком

Виды машин по характеру их взаимодействия с человеком можно разделить на 4 категории:

1. Механизированный инструмент (ручные машины).

Этот вид машин выполняет в технологическом процессе, как правило, лишь небольшую, но существенную часть операций, требующую больших энергетических затрат, например вращение рабочего инструмента.

Остальные операции: переноска, удержание в рабочем положении, обеспечение осевого усилия и другие, как правило, выполняются за счет физической силы человека.

К таким видам машин относятся: электродрели, электрорубанки и электроперфораторы, пневматические гайковерты и отбойные молотки, пневматические перфораторы, бензопилы и многие другие ручные машины.

Основной особенностью этих машин является то, что режим и производительность их работы в значительной степени зависят от физических возможностей человека.

2. Машины с ручным управлением.

Машины с ручным управлением выполняют в производственном процессе основную часть операций при непосредственном участии человека. К ним можно отнести основные виды транспортных средств, некоторые виды станков, не оснащенных средствами автоматизации, компьютеры, работающие

в режиме диалога с оператором. Работа таких машин в большой степени связана с физическими и умственными возможностями человека.

3. Машины-полуавтоматы.

Машины-полуавтоматы требуют выполнения вручную только подготовительных и заключительных операций, например по закреплению заготовок и снятию готовой продукции, выполнение же основных рабочих операций, например вращение детали на токарном станке, подача резца может производиться в автоматическом режиме, но под контролем человека.

К машинам-полуавтоматам относятся, в частности, значительная часть станочного парка, компьютеры, системы автопилота на воздушных судах и многие другие.

4. Машины-автоматы.

В машинах-автоматах все операции производятся в автоматическом режиме, оставляя за человеком лишь контрольные функции и функции загрузки сырья и выгрузки товара. К ним относятся, например, автоматы для изготовления и упаковки сигарет, автоматизированные линии по розливу напитков, электронные автоматы (контроллеры) по регулировке дорожного движения, различные роботы и другие машины.

Выбор того или иного вида машин непосредственно связан с технологией и количеством производства продукции и в основном определяется экономической целесообразностью.

В частности, механизированные инструменты наиболее широко используются в строительстве, а машины с ручным управлением широко используются при изготовлении разовых изделий, например гравировке надписей или рисунков, изготовлении штампов, прессформ, моделей или опытных образцов, машины-полуавтоматы в основном используются при изготовлении единичной и мелкосерийной продукции, а машины-автоматы при производстве серийной или массовой продукции.

Все инструменты и машины, как уже указывалось выше, в процессе своей работы тем или иным образом воздействуют на работающего с ними человека, так как могут быть источниками шума, вибрации, пыли, масляных аэрозолей, газов, физических и психологических нагрузок и так далее.

Поэтому, кроме определенного набора технических параметров, обеспечивающих выполнение требуемых технологических операций, они должны также соответствовать гигиеническим, эргономическим и экологическим требованиям, регламентируемым соответствующими нормативными документами, чем будет в определенной степени гарантирована их безопасность для здоровья человека.

Кроме систем «человек-машина», где человек и машина находятся «один на один», имеется большое число сложных производств, когда имеет место взаимодействие многих систем «человек-машина», которые необходимо координировать между собой.

В качестве примеров можно привести потоки автотранспорта, конвейерные линии, транспортные средства, управляемые экипажами, энергосистемы и другое.

Спецификой работы таких систем «человек- машина» является необходимость наличия общих систем управления, решающих задачи их координации.

В основе деятельности таких систем, как правило, лежит прием информации, ее обработка, принятие решений и контроль за их выполнением.

Кроме перечисленных, одним из основных параметров систем «человек - машина» так же является их надежность. Этот вопрос будет рассмотрен ниже.

Труд человека и работа машин в системе «человек – машина» также сопряжены и с определенными энергетическими затратами.

Энергетические параметры машин в достаточной степени описываются известными законами физики и термодинамики.

Энергетика человека, представляющего собой живой организм, в отличие от машин, наряду с законами физики, подчиняется еще и целому ряду биологических законов, в частности законам термодинамики биологических систем.

Глава 2. Основные положения термодинамики материальных систем

2.1. О становлении термодинамики как науки

По общепринятому определению, термодинамика - наука о наиболее общих свойствах макроскопических материальных систем, находящихся в различных состояниях относительно термодинамического равновесия, и о процессах переходов между этими состояниями.

К настоящему времени термодинамика содержит два основных раздела:

Равновесная термодинамика - термодинамика изолированных систем, и неравновесная термодинамика – термодинамика открытых систем.

Равновесная термодинамика в основном была разработана в середине 19-го – начале 20-го века и содержит три закона – три «Начала»:

- в середине 19-го века Ю. Р. Майером, Дж. Джоулем и Г. Гельмгольцем был впервые сформулирован первый закон термодинамики - «Первое начало термодинамики».

- в 1850 году Р. Клаузиусом, и независимо от него в 1851 году У. Томсоном было сформулировано «Второе начало термодинамики».

- в 1906 году В. Нернст сформулировал «Третье начало термодинамики».

Неравновесная термодинамика была разработана в 20-м веке.

Она содержит два основных подраздела:

- слабо неравновесную термодинамику, основы которой разработаны в 1931 году Л. Онсагером;

- сильно неравновесную термодинамику, в основном разработанную Г. Хакеном, И. Пригожиным и Р. Томом в середине 20-го века.

2.2. Основные термины и положения традиционной термодинамики

До настоящего времени под термином «термодинамическая система» понимается совокупность макроскопических объектов (тел или полей), обменивающихся энергией и веществом друг с другом и с внешней средой.

Традиционно, в зависимости от характера взаимодействия с окружающей средой термодинамические системы делятся на три условных типа:

- *изолированная* – система, которая не обменивается с окружающей средой ни веществом, ни энергией;
- *закрытая* – система, которая может обмениваться с окружающей средой лишь энергией и не может обмениваться веществом;
- *открытая* – система, которая обменивается с окружающей средой и энергией, и веществом.

Состояние любой термодинамической системы характеризуется двумя группами параметров:

Интенсивными термодинамическими параметрами (давление, температура и др.), не зависящими от массы или числа частиц в системе;

Экстенсивными термодинамическими параметрами (общая энергия, энтропия, внутренняя энергия), зависящими от массы или числа частиц в системе.

Изменение параметров термодинамической системы называется *термодинамическим процессом*.

Энергию системы (W) можно представить как сумму двух частей: зависящую от движения и положения системы как целого ($W_{ц}$) и не зависящую от этих факторов (U):

$$W = W_{ц} + U \quad (2.1)$$

Вторую составляющую этой совокупности U называют *внутренней энергией* системы. Она включает энергию теплового движения частиц, а также химическую и ядерную энергию, определяющую поступательное, колебательное и вращательное движение молекул, внутримолекулярное взаимодействие и колебание атомов, энергию вращения электронов.

Внутренняя энергия U в свою очередь разделяется на *свободную энергию* и *связанную энергию*.

Свободная энергия (G) – та часть внутренней энергии, которая может быть использована для совершения работы.

Связанная энергия ($W_{св}$) – та часть энергии, которую нельзя превратить в работу.

Отсюда:

$$U = G + W_{св} \quad (2.2)$$

В результате *потоков и термодинамических сил* в термодинамических системах, образующихся в результате градиентов температур, концентраций компонентов, химических потенциалов, возникают необратимые процессы теплопроводности, диффузии, химических реакций.

Эти процессы характеризуются тепловыми и диффузионными потоками, скоростями химических реакций и т.д.

Они называются общим термином «потоки» и обозначаются J_i , а вызывающие их причины (отклонения термодинамических параметров от равновесных значений) — термодинамическими силами (X_k).

Связь между J_i и X_k , если термодинамические силы малы, записывают в виде линейных уравнений:

$$j_i = \sum_{k=1}^m L_{ik} X_k \quad (2.3)$$

где $i = 1, 2, \dots, m$

2.3. Общие сведения о равновесной термодинамике

2.3.1. Первое начало термодинамики

Первое начало термодинамики представляет собой закон сохранения энергии для систем, в которых существенное значение имеют тепловые процессы

Согласно первому началу термодинамики, термодинамическая система (например, пар в тепловой машине) может совершать работу только за счёт своей внутренней энергии или каких-либо внешних источников энергии.

Первое начало термодинамики объясняет невозможность существования вечного двигателя 1-го рода, который совершал бы работу, не черпая энергию из какого-либо источника.

Сущность первого начала термодинамики заключается в следующем:

При сообщении термодинамической системе некоторого количества теплоты Q в общем случае происходит изменение внутренней энергии системы ΔU и система совершает работу A :

$$Q = \Delta U + A \quad (2.4)$$

Уравнение (2.4), выражающее первое начало термодинамики, является определением изменения внутренней энергии системы (ΔU), так как Q и A — независимо измеряемые величины.

Внутреннюю энергию системы U можно, в частности, найти, измеряя работу системы в адиабатном процессе (то есть при $Q = 0$): $A_{ад} = -\Delta U$, что определяет U с точностью до некоторой аддитивной постоянной U_0 :

$$U = U + U_0 \quad (2.5)$$

Первое начало термодинамики утверждает, что U является функцией состояния системы, то есть каждое состояние термодинамической системы характеризуется определённым значением U , независимо от того, каким путем система приведена в данное состояние (в то время как значения Q и A зависят от процесса, приведшего к изменению состояния системы).

При исследовании термодинамических свойств физической системы первое начало термодинамики обычно применяется совместно со вторым началом термодинамики.

2.3.2. Второе начало термодинамики

Второе начало термодинамики, сформулированное в 1850 году Р. Клаузиусом, и независимо от него в 1851 году У. Томсоном, является законом, в соответствии с которым макроскопические процессы, протекающие в термодинамических системах с конечной скоростью, необратимы.

В отличие от идеальных (без потерь) механических или электродинамических обратимых процессов, реальные процессы, связанные с теплообменом при конечной разности температур (т.е. текущие с конечной скоростью), сопровождаются разнообразными потерями: на трение, диффузию газов, расширением газов в пустоту, выделением джоулевой теплоты и т.д.

Процессы, происходящие в них, необратимы, то есть могут самопроизвольно протекать только в одном направлении.

Второе начало термодинамики возникло исторически при анализе работы тепловых машин.

Само название «Второе начало термодинамики» и первая его формулировка (1850 г.) принадлежат Р. Клаузиусу: «...невозможен процесс, при котором теплота переходила бы самопроизвольно от тел более холодных к телам более нагретым».

Причем такой процесс невозможен в принципе: ни путем прямого перехода теплоты от более холодных тел к более теплым, ни с помощью каких-либо устройств без использования каких-либо других процессов.

В 1851 году английский физик У. Томсон дал другую формулировку второго начала термодинамики: «В природе невозможны процессы, единственным следствием которых был бы подъем груза, произведенный за счет охлаждения теплового резервуара».

Как видно, обе приведённые формулировки второго начала термодинамики практически одинаковы.

Отсюда следует невозможность реализации двигателя 2-го рода, т.е. двигателя без потерь энергии на трение и другие сопутствующие потери.

Кроме того, отсюда также следует, что все реальные процессы, происходящие в материальном мире в открытых системах, необратимы.

В современной термодинамике второе начало термодинамики изолированных систем формулируется единым и самым общим образом как

закон возрастания особой функции состояния системы, которую Клаузиус назвал энтропией (S).

Физический смысл энтропии состоит в том, что в случае, когда материальная система находится в полном термодинамическом равновесии, элементарные частицы, из которых состоит эта система, находятся в неуправляемом состоянии и совершают различные случайные хаотические движения.

Параметр, который характеризует общее число этих состояний, и есть энтропия.

В принципе можно определить общее число этих всевозможных состояний.

Рассмотрим простой пример.

Пусть изолированная термодинамическая система состоит из двух тел «1» и «2», обладающих неодинаковой температурой $T_1 > T_2$.

Тело «1» отдает некоторое количество тепла Q , а тело «2» его получает. При этом идет тепловой поток от тела «1» к телу «2». По мере уравнивания температур увеличивается суммарное количество элементарных частиц тел «1» и «2», находящихся в тепловом равновесии.

По мере увеличения этого количества частиц увеличивается и энтропия. И как только наступит полное тепловое равновесие тел «1» и «2», энтропия достигнет своего максимального значения.

Таким образом, в изолированной системе энтропия S при любом реальном процессе либо возрастает, либо остаётся неизменной, т.е. изменение энтропии ΔS всегда больше или равно нулю.

В состоянии равновесия, когда энтропия изолированной системы достигает максимума, никакие макроскопические процессы в такой системе, согласно второму началу термодинамики, невозможны. Отсюда следует, что энтропия - физическая величина, количественно характеризующая особенности молекулярного строения системы, от которых зависят энергетические преобразования в ней.

Связь энтропии с молекулярным строением системы первым объяснил Л. Больцман в 1887 году.

Он установил статистический смысл энтропии:

$$S = k \ln P, \quad (2.6)$$

где $k = 1.37 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана, P – статистический вес.

Согласно Больцману, высокая упорядоченность имеет относительно низкую вероятность.

Статистический вес P (число способов, которыми может быть реализовано данное состояние системы) пропорционален числу возможных микроскопических состояний элементов макроскопической системы (например, различных распределений значений координат и импульсов молекул газа, отвечающих определённому значению энергии, давления и других термодинамических параметров газа), т. е. характеризует возможное

несоответствие микроскопического описания макросостояния. Иными словами, P – термодинамическая вероятность, определяемая распределением атомов (молекул) по скоростям и в пространстве. Для изолированной системы термодинамическая вероятность W данного макросостояния пропорциональна его статистическому весу и определяется энтропией системы, как это видно из формулы (2.7):

$$W = \exp(S/k). \quad (2.7)$$

Таким образом, закон возрастания энтропии имеет статистически вероятностный характер и выражает постоянную тенденцию системы к переходу в более вероятное состояние. Отсюда следует, что наиболее вероятным состоянием, достижимым для системы, является такое, в котором события, происходящие в системе одновременно, *статистически взаимно компенсируются*.

Максимально вероятным состоянием изолированной макросистемы является состояние равновесия, которого она может в принципе достичь за достаточно большой промежуток времени.

Как было указано выше, энтропия является величиной аддитивной, то есть она пропорциональна числу частиц в системе. Поэтому для систем с большим числом частиц даже самое ничтожное относительное изменение энтропии, приходящейся на одну частицу, существенно меняет её абсолютную величину. Изменение же энтропии, стоящей в показателе экспоненты в уравнении (2.7), приводит к изменению вероятности данного макросостояния W в огромное число раз. Именно этот факт является причиной того, что для системы с большим числом частиц следствия второго начала термодинамики практически имеют не вероятностный, а достоверный характер.

Крайне маловероятные процессы, сопровождающиеся сколько-нибудь заметным уменьшением энтропии, требуют столь огромных времен ожидания, что их реализация является практически невозможной. В то же время малые части системы, содержащие небольшое число частиц, испытывают непрерывные флуктуации, сопровождающиеся лишь небольшим абсолютным изменением энтропии. Средние значения частоты и размеров этих флуктуаций являются таким же достоверным следствием статистической термодинамики, как и само второе начало термодинамики.

Буквальное применение второго начала термодинамики ко Вселенной как целому, приведшее Клаузиуса к неправильному выводу о неизбежности «тепловой смерти Вселенной», является неправомерным, так как в природе в принципе не может существовать абсолютно изолированных систем.

2.3.3. Третье начало термодинамики

Третье начало термодинамики было сформулировано В. Нерстом в 1906 году (тепловой закон Нернста). Согласно этому закону энтропия S любой

системы стремится к конечному для неё пределу, не зависящему от давления, плотности или фазы, при стремлении температуры (T) к абсолютному нулю.

Третье начало термодинамики позволяет находить абсолютное значение энтропии, что нельзя сделать на основе первого и второго начал термодинамики. В классической термодинамике (первого и второго начал) энтропия может быть определена лишь с точностью до произвольной аддитивной постоянной S_0 . Это практически не мешает большинству термодинамических исследований, так как реально измеряется разность энтропий (S_0) в различных состояниях.

Макс Планк в 1911 году дал другую формулировку третьего начала термодинамики - как условие обращения в нуль энтропии всех тел при стремлении температуры к абсолютному нулю:

$$\lim_{T \rightarrow 0} S = 0. \quad (2.8)$$

Отсюда $S_0 = 0$. Это даёт возможность определять абсолютное значение энтропии и других термодинамических потенциалов.

Формулировка Планка соответствует определению энтропии в статистической физике через термодинамическую вероятность (W) состояния системы:

$$S = k \ln W. \quad (2.9)$$

При абсолютном нуле температуры система находится в основном квантово-механическом состоянии, если оно невырождено (то есть возможны и другие состояния системы), для которого $W = 1$ (состояние реализуется единственным микрораспределением).

Следовательно, энтропия S при $T = 0$ равна нулю. В действительности при всех измерениях стремление энтропии к нулю начинает проявляться значительно раньше, чем может стать существенной при стремлении T к нулю. Здесь играет роль дискретность квантовых уровней макроскопической системы, приводящая к явлениям квантового вырождения.

Из третьего начала термодинамики следует, что абсолютного нуля температуры нельзя достигнуть ни в каком конечном процессе, связанном с изменением энтропии, к нему можно лишь асимптотически приближаться.

2.4. Общие сведения о неравновесной термодинамике

2.4.1. Основные термодинамические свойства материи

Рассмотренная выше классическая термодинамика (ее три «начала») изучает термодинамические равновесные, обратимые процессы.

Для неравновесных процессов она устанавливает лишь неравенства, которые указывают возможное направление этих процессов.

Однако дальнейшее развитие физики показало, что весь материальный мир представляет собой открытые термодинамические системы, между

которыми происходят неравновесные процессы – непрерывный обмен энергией и веществом.

Основная задача неравновесной термодинамики – количественное изучение неравновесных процессов, в частности определение их скоростей в зависимости от внешних условий.

В неравновесной термодинамике системы, в которых протекают неравновесные процессы, рассматриваются как непрерывные среды, а их параметры состояния – как полевые переменные, то есть непрерывные функции координат и времени.

Рассмотрим основные неравновесные термодинамические свойства неживой материи.

Весь окружающий нас материальный мир находится в процессе движения. Это движение обусловлено кинетической и потенциальной энергией материи, взаимодействием ее силовых полей.

Совершают тепловые движения элементарные частицы, движутся различные макрообъекты: воздушные и водные потоки, планеты, звезды, галактики и т.д.

При этом происходят непрерывные процессы обмена энергией и веществом как между разными объектами термодинамических систем, так и внутри них. Это связано с тем, что между объектами термодинамических систем всегда существует определенное неравновесное термодинамическое состояние – энергетические потоки между объектами никогда не могут быть равными, так как не могут быть абсолютно равными массы и температуры этих объектов, а так же и другие параметры. Кроме того, эти энергетические потоки непрерывно меняются по своей величине как в связи с изменениями в результате изменений степени неравновесности их термодинамических состояний, так и в связи с их непрерывными перемещениями в пространстве.

Поскольку в связи с неравновесным термодинамическим состоянием каждый материальный объект одновременно в разной степени обменивается энергией и веществом со всеми другими материальными объектами, можно утверждать, что ни при каких обстоятельствах невозможно обеспечить обратные процессы. В силу того, что потоки энергии и вещества между материальными объектами непрерывно изменяются и непрерывно изменяется их термодинамическое состояние, изменяются при этом и закономерности взаимодействия материальных объектов, а также и их физическое и термодинамическое состояния.

2.4.2. Пассивные и активные неравновесные термодинамические системы

Исследования, проведенные автором в области термодинамики, показали, что принятое определение открытых термодинамических систем, является неполным.

В материальном мире между открытыми термодинамическими системами происходит не только непрерывный обмен энергией и веществом, как указано в общепринятом определении открытых термодинамических систем

(упомянутом выше), но и преобразование одних видов энергии и веществ в другие.

Термодинамические процессы, происходящие как внутри, так и между термодинамическими системами, могут иметь два качественно разных характера:

1 - перераспределение существующих в них энергий, например перераспределение тепловой энергии и плотности материи.

Назовем такие термодинамические системы **пассивными**.

2 - преобразование одних видов энергии и вещества в другие, например в процессах, химической или ядерной реакций.

Назовем такие термодинамические системы **активными**.

Рассмотрим основные свойства пассивных и активных термодинамических систем.

2.4.2.1. Анализ основных свойств пассивных термодинамических систем

Если между двумя пассивными термодинамическими системами, например I и II, существует градиент температур, то, в соответствии со 2-м началом термодинамики, между ними возникнет поток энергии, направленный от более нагретой системы к менее нагретой.

При установившемся термодинамическом процессе, например между бесконечно большими термодинамическими системами, температура которых практически не зависит от времени, он может быть описан уравнением теплопроводности Фурье:

$$J_q = -k \cdot \text{grad}T(x), \quad (2.10)$$

где J_q – вектор потока тепла — количество энергии, проходящей через единицу площади (плотность потока энергии) в единицу времени, перпендикулярной оси x , k — коэффициент теплопроводности, T — температура.

В случае неустановившегося термодинамического процесса, при котором термодинамические системы I и II с начальными температурами соответственно $T_1 \neq T_2$ обмениваются между собой тепловой энергией, и при этом температуры указанных систем соответственно меняются, он может быть описан уравнением

$$J = f(t) = \frac{-k(T_1 - T_2)}{t} \rightarrow 0. \quad (2.11)$$

Отсюда:

$$t = \frac{-k(T_1 - T_2)}{J} \rightarrow \infty. \quad (2.12)$$

Из (2.12) следует:

- 1) *макрообъекты пассивных термодинамических систем непрерывно стремятся к термодинамическому равновесию, но никогда его не достигают;*
- 2) *пассивные термодинамические системы, между которыми происходит обмен энергией, всегда находятся в неустойчивом неравновесном термодинамическом состоянии.*

Таким образом, тепловая энергия каждой из указанных двух пассивных термодинамических систем может быть представлена в виде:

$$Q(t) = Q_{\text{lim}} \pm \Delta Q(t), \quad (2.13)$$

где Q_{lim} – величина тепловой энергии равновесного состояния термодинамической системы, к которой она стремится, $\Delta Q(t)$ – остаточная тепловая энергия неравновесного состояния термодинамической системы, участвующая в обмене энергией.

2.4.2.2. Анализ основных свойств активных термодинамических систем

При установившемся в течение определенного времени процессе функционирования активных термодинамических систем он, в соответствии с 1-м началом термодинамики, сопровождается постоянным выделением либо поглощением тепловой энергии.

При этом внутренняя тепловая энергия этих систем не меняется:

$$Q_{\text{ср.вн}} = \text{const}, \quad (2.14)$$

а их термодинамическое состояние можно определить как *неравновесное устойчивое*:

$$Q_{\text{ч}} = Q_{\text{ср.вн}} + W_{\text{к}} + Q_{\text{Т}}, \quad (2.15)$$

где $W_{\text{к}}$ – преобразуемая энергия, $Q_{\text{Т}}$ – тепловая энергия, выделяемая в окружающую среду.

Таким образом, при установившемся режиме *активные термодинамические системы в процессе их функционирования всегда находятся в устойчивом неравновесном термодинамическом состоянии.*

Это определение нетрудно подтвердить следующими примерами.

В двигателе внутреннего сгорания происходят реакции окисления подаваемого в его топлива, в результате чего выделяется тепловая энергия, используемая посредством соответствующих приводов, например, для передвижения автотранспортного средства. Поскольку, в соответствии с первым началом термодинамики, коэффициент полезного действия такого двигателя $\eta < 100\%$, происходит соответствующий нагрев его корпуса и других деталей до определенного уровня, при котором плотность поступающей энергии становится равной плотности энергии, отдаваемой в атмосферу. Это

условие должно безусловно выполняться, так как иначе при перегреве двигателя он выйдет из строя.

Аналогичные процессы происходят и с живыми организмами.

Их жизнедеятельность основана на химической переработке продуктов питания, в результате которой выделяется необходимая им энергия, расходуемая на кинетическую и тепловую энергии, а также на синтез органических веществ в случае роста живых организмов и увеличения, тем самым, их массы.

Рассмотрим эти процессы на примере организма человека.

В процессе своей жизнедеятельности он ежедневно принимает пищу, содержащую определенное количество энергии, потребляет определенное количество кислорода и других веществ.

Однако в результате этого ни его масса, ни химический состав в течение достаточно долгого времени, например нескольких месяцев, практически не меняется.

При этом человек ежедневно совершает физическую работу, затрачивая кинетическую энергию, а так же постоянно, в определенных пределах, поддерживает температуру своего тела около 36,6 °С.

Таким образом очевидно, что энергия, потребляемая человеком из внешней среды, преобразуется, как это было указано выше, в другие виды энергии: кинетическую и тепловую, при том, что его внутренняя энергия в среднем остается постоянной.

Физико-химик Илья Романович Пригожин, лауреат Нобелевской премии, для упрощения анализа термодинамических систем разделил их термодинамические состояния на три большие группы: *равновесную*, в которой производство энтропии, потоки и силы равны нулю, *слабо неравновесную*, в которой термодинамические силы «слабы», и энергетические потоки линейно зависят от сил, и *сильно неравновесную*, или *нелинейную*, где энергетические потоки нелинейны, а все термодинамические процессы носят необратимый характер.

Слабо неравновесная (линейная) термодинамика рассматривает термодинамические процессы, происходящие в системах в состояниях, близких к равновесию. Таким образом, линейная термодинамика описывает стабильное, предсказуемое поведение систем, стремящихся к минимальному уровню активности.

Первые работы в этой области принадлежат Ларсу Онсагеру, который в 1931 году впервые открыл общие соотношения неравновесной термодинамики в линейной, слабо неравновесной области - «соотношения взаимности».

Суть их чисто качественно сводится к следующему: если сила «один» (например, градиент температуры) для слабо неравновесных ситуаций воздействует на поток «два» (например, на диффузию), то сила «два» (градиент концентрации) воздействует на поток «один» (поток тепла).

Таким образом, в слабо неравновесной области практически действуют законы равновесной термодинамики, система ни к чему не стремится и ее поведение в большинстве случаев вполне предсказуемо.

Сильно неравновесная термодинамика рассматривает процессы, происходящие в системах, состояние которых далеко от равновесия.

Когда термодинамические силы, действуя на систему, становятся достаточно большими и выводят ее из линейной области в нелинейную, устойчивость состояния системы и ее независимость от флуктуации значительно уменьшается.

Например по мере нагревания горючей жидкости ее безопасность начинает уменьшаться, так как со все большей вероятностью любая причина, повлекшая за собой повышение ее температуры, может привести к взрыву – лавинообразному процессу ее окисления, сопровождающимся выделением тепла.

При этом в большом количестве случаев имеется вероятность перехода системы из одного состояния в одно из нескольких других, например, направление падения неустойчиво стоящего столба.

Переход в соответствующее состояние определяется флуктуацией – случайным изменением внешней среды, спровоцировавшем переход системы в это состояние.

В качестве примера здесь можно привести случайное из нескольких возможных направление потоков лавы при извержении вулкана.

В таких состояниях определенные флуктуации усиливают свое воздействие над системой, вынуждая ее при достижении точки бифуркации – потери устойчивости, эволюционировать к новому состоянию, которое может быть качественно отличным от исходного.

Происходят бифуркационные процессы системы.

Причем считается, что развитие таких систем протекает путем образования нарастающей упорядоченности.

На этой основе и возникло представление о самоорганизации материальных систем.

2.4.2.3. Самоорганизация неживой материи

Параметры окружающей среды, воздействующие на то или иное макроскопическое тело, аналогично воздействуют так же и на другие тела, находящиеся рядом с первым и имеющие аналогичные физические свойства, например пыль, капли жидкости, газы и т.д.

При этом, благодаря их общим параметрам и близким условиям воздействия внешней среды, у них будут происходить и очень близкие по своим параметрам термодинамические процессы.

Например пыль под действием ветра будет двигаться в одном направлении, образуя поток, капли воды, падающие на Землю во время дождя, будут слипаться между собой, так же образуя соответствующие потоки с соответствующими физическими свойствами, при перепадах атмосферного давления, температур и других параметров воздушных масс будут формироваться их потоки, образующие ветер, смерчи и т.д.

Рассматривая космические объекты, легко убедиться в том, что Земля и другие планеты в результате сил гравитации и кинетической энергии вращаются вокруг Солнца, которое, в свою очередь, совершает определенное организованное движение в составе Галактики под групповым действием других звезд и т.д.

Соответствующие преобразования материи происходят и на уровне элементарных частиц.

Например, если энергия воздействия окружающей среды превышает энергию связи частиц, то они не смогут удерживаться вместе и распадутся, например расщепление ядер при воздействии на них частиц высоких энергий. При снижении энергии воздействия до значений, при которых энергия среды будет меньше энергии связи частиц, в случае обратимых процессов может происходить процесс восстановления взаимосвязи частиц (допустим, протона и электрона) в атоме водорода, а в случае необратимых – нет. В качестве примера здесь можно привести распад радиоактивных веществ, так как для этого могут потребоваться совсем другие условия окружающей среды.

Рассматриваемые процессы называются самоорганизацией неживой материи.

Самоорганизация материи является фундаментальным свойством природы принимать те или иные формы упорядочивания организации вещества. Формы упорядочивания организации вещества зависят как от его внутреннего термодинамического состояния и условий окружающей среды, так и от внутреннего взаимодействия его элементов, определенного их физическими свойствами дискретно или в определенных интервалах.

На микроуровне - уровне элементарных частиц, форма их упорядочивания ограничена дискретными свойствами, описанными законами квантовой механики.

В связи с этим, например, молекула воды H_2O всегда может содержать только два атома водорода – Н и один атом кислорода О. В случае расщепления молекулы воды на атомы водорода – Н и кислорода О вода как таковая перестанет существовать.

На макроуровне материя может создавать неограниченное количество самых разных форм и связей, определяемых законами макроскопической физики: полей гравитации, электромагнитных полей и других. Причем та или иная форма существования материи может находиться лишь в том или ином интервале условий окружающей среды.

Например, та же вода может существовать при определенных условиях в форме жидкости в интервале температур от $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

При температуре ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ она будет в виде льда, при температуре выше $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ – в виде газа, при других условиях – в виде плазмы.

Отсюда следует, что при изменении окружающей обстановки материя, находящаяся изначально в определенной форме в условиях, близким к равновесному термодинамическому состоянию, может оказаться в условиях сильно неравновесного термодинамического состояния, в результате чего при

превышении определенного значения она может скачкообразно перейти от одной формы упорядочивания организации ее вещества к другой.

Условия перехода материи из одной формы в другую для каждого конкретного вещества являются вполне определенными, зависящими как от собственного физического состояния вещества, так и от окружающей среды и могут быть обратимыми и необратимыми.

Обратимыми являются переходы веществ от одного состояния к другому и обратно, происходящих при однозначном количественном изменении одних и тех же условий – например повышении или понижении температуры.

Необратимыми являются переходы веществ от одного состояния к другому и обратно при разных условиях, например процессы окисления и восстановления веществ, так как они проходят при совершенно разных химических реакциях.

Отсюда следует:

Самоорганизация неживой материи является качественно неразвивающимся процессом. Неживая материя лишь принимает те или иные формы своей самоорганизации в зависимости от собственных свойств и свойств окружающей среды.

Законы самоорганизации живой материи будут рассмотрены ниже.

Глава 3. Основные положения термодинамики биологических систем

Труд человека, так же как и работа машины, сопряжен с определенными энергетическими затратами. Однако биологическая природа человека, представляющего собой живой организм, в отличие от машин, подчиняется, наряду с физическими законами, еще и целому ряду биологических законов, в частности законам термодинамики биологических систем.

В связи с этим для определения законов функционирования систем «человек - машина» рассмотрим основные энергетические процессы, происходящие в живых организмах.

3.1. Общие сведения о фотосинтезе и хемосинтезе

Для обеспечения жизнедеятельности всем живым организмам требуется энергия.

В настоящее время известно два способа получения энергии живыми организмами:

1. Путем фотосинтеза, осуществляемого растениями с помощью молекул хлорофилла, которые преобразуют лучистую энергию Солнца в химическую энергию.

Тем самым они обеспечивают работу многочисленных фотофизических, фотохимических, биохимических и иных процессов, происходящих в их клетках.

2. Путем хемосинтеза - окислений неорганических соединений, осуществляемых некоторыми бактериями, при которых выделяемая энергия так же обеспечивает работу указанных выше процессов.

3.1.1. Фотосинтез

В области фотосинтеза первые работы были выполнены в 17-м веке голландским естествоиспытателем, врачом и теософом-мистиком Ван Гельмонтом, который установил, что почва не является источником материала для построения растущего дерева.

В 1771 г. английский ученый Джозеф Пристли сделал следующее открытие: он заметил, что зеленые растения на свету продолжают жить в атмосфере CO_2 и даже делают его пригодным для дыхания.

В течение последующих лет серьезные работы по фотосинтезу не велись, и возобновились лишь в 1905 году, когда известный английский физиолог растений Фредерик Блэкман установил новые законы, по которым проходят процессы фотосинтеза. Он показал, что фотосинтез начинается уже при слабом освещении, а также то, что скорость фотосинтеза пропорциональна величине светового потока до определенного значения. Кроме того, Блэкманом была установлена зависимость скорости фотосинтеза от температуры.

На основании этих экспериментов Блэкман сделал вывод, что происходят два процесса, один из которых в значительной степени зависит от уровня освещения, но не зависит от температуры, а второй зависит от температуры и не зависит от уровня света.

В результате дальнейших исследований, в 1932 году, американскими биохимиками Р. Эмерсоном и В. Арнольдом было установлено, что темновая стадия во много раз длительнее световой.

Ученые пытались объяснить это тем, что во время световой вспышки растение запасает энергию, которая необходима для успешного хода каких-то темновых процессов, видимо, связанных с фиксацией в растении углекислого газа.

Этот последний процесс (в отличие от светового) идет медленно, и, пока он не завершится, бесполезно вводить в растение новые порции световой энергии.

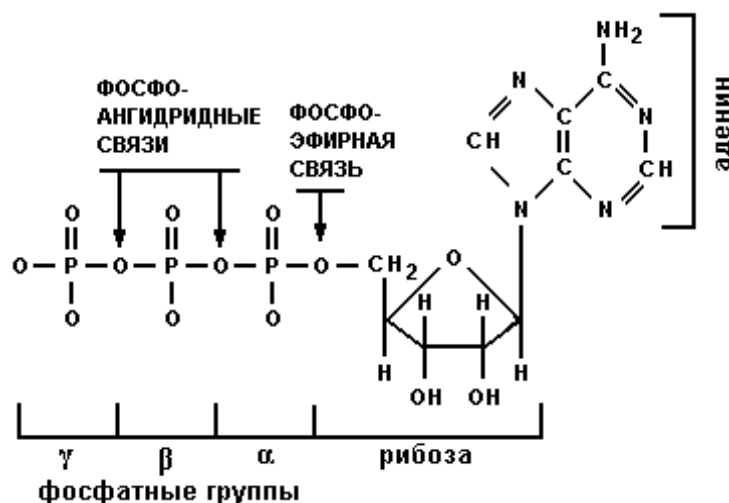
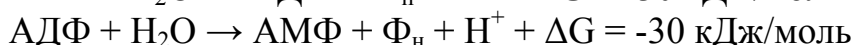
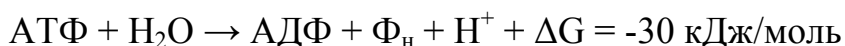


Рис. 3.1. Структура АТФ

Позже, в 1954 году, американский биохимик Даниел Исраэл Арнон открыл процесс фотосинтетического фосфорилирования, при котором растениями синтезируется аденозинтрифосфат (АТФ), содержащий в себе большое количество энергии, которая затем может быть использована в результате его расщепления путем гидролиза. Структура АТФ показана на рис. 3.1.

Как видно из рис. 3.1, АТФ состоит из трех фосфатных групп, остатков азотистого основания (аденина) и остатка сахара (рибозы).

При разрыве фосфоангидридных и фосфоэфирной связей выделяется энергия. Фосфатные группы могут быть поэтапно отщеплены путем растворения в воде (гидролиза) и образования ортофосфата или неорганического фосфата и аденозиндифосфата АДФ, а после расщепления АДФ и аденозинмонофосфата с выделением энергии на каждой стадии:



Здесь: $\text{P}_\text{н}$ - неорганический фосфат; H^+ - положительный ион водорода; ΔG - изменение свободной энергии, выделяемой при отрыве концевой фосфатной группы. Обычно клетки извлекают энергию из АТФ во время клеточного дыхания, отщепляя от его молекулы только одну фосфатную группу.

На рис. 3.2 приведен пример упрощенного графика циклов синтеза-расщепления АТФ.

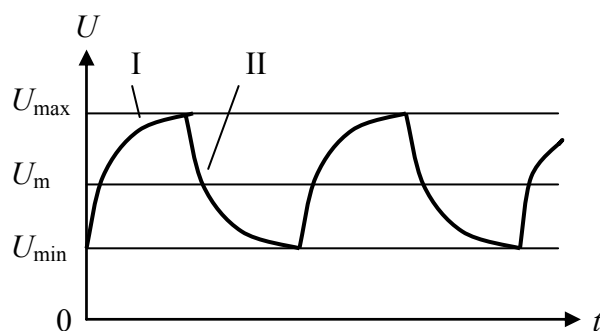


Рис. 3.2. Упрощенный график синтеза-расщепления АТФ.
 U - количество АТФ в клетке;
 I – процесс синтеза; II – процесс расщепления.

Как видно из графика на рис. 3.2, изображенные на нем процессы синтеза АТФ (кривая I), и расщепления АТФ (кривая II) представляют собой непрерывную последовательность циклов, причем оба процесса протекают по законам, близким к экспонентам.

Верхние и нижние границы концентрации биохимических веществ $U_{\max}$ и $U_{\min}$ определяются положительной и отрицательной обратными связями, имеющимися в клетках, о которых будет указано ниже.

Дальнейшие исследования проблем фотосинтеза в основном были направлены на изучение многочисленных узких вопросов в биофизических и биохимических процессах, происходящих в клетках растений. В их числе изучение молекулярных механизмов биологического использования солнечной энергии, практического использования закономерностей соотношений длительностей темных и светлых стадий для повышения урожайности сельскохозяйственных культур и других целей.

В частности, российским ученым А.А. Красновским были предложены оригинальные модели фотосинтеза, основанные на сопряженном действии изолированных пигментов, неорганических фотокатализаторов и ферментных систем бактериальной клетки.

Кроме того, им были проведены всесторонние исследования эволюции фотосинтеза и путей биологического использования солнечной энергии.

Таким образом, несмотря на большое внимание ученых к проблеме фотосинтеза, она из-за сложности протекающих процессов до конца не изучена, а установлены лишь определенные этапы, из которых два можно считать наиболее существенными:

1. Процесс фотосинтеза происходит в виде двух стадий: световой и темновой;
2. Конечным результатом фотосинтеза является аденозинтрифосфат (АТФ), обеспечивающий хранение и выделение больших количеств энергии.

3.1.2. Хемосинтез

Хемосинтез (хемолитоавтотрофия) - тип питания, свойственный некоторым бактериям, способным усваивать CO_2 как единственный источник

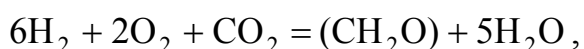
углерода за счёт энергии окисления неорганических соединений, был открыт в 1887 году С.Н.Виноградским.

Сущностью этого процесса является то, что необходимая для жизни энергия выделяется в результате различных окислительно-восстановительных реакций.

Это открытие в значительной степени изменило представление ученых об обмене веществ, происходящих в живых организмах.

Для получения энергии путем окислительно-восстановительных реакций бактериями окисляется водород, окись углерода, восстановленные соединения серы, железо, аммиак, нитриты, сурьма и другие вещества.

Наиболее многочисленной группой хемосинтезирующих организмов являются водородные бактерии, которые для выделения энергии осуществляют реакцию:



где (CH_2O) — условное обозначение образующихся органических веществ.

Биосинтез органических соединений при хемосинтезе осуществляется точно так же, как и при фотосинтезе, конечным результатом которого является АТФ. Другие живые организмы получают АТФ уже из растений, используя их в качестве продуктов питания.

Поэтому основными биохимическими реакциями, происходящими в живых организмах, следует считать те, которые направлены на обеспечение организма необходимой энергией, то есть синтез и расщепление АТФ.

3.2. Первый закон термодинамики биологических систем («Всеобщий закон биологии» Э.С. Бауэра)

Наряду с теоретическими работами физиков над проблемами законов термодинамики, этой же проблемой, но применительно к биологии, в начале 20-го века занимался венгерско-российский ученый, биолог-теоретик Эрвин Симонович Бауэр.

В то время биология как наука еще не была достаточно развита. Еще не был известен состав клеток и их основные функции, и было общепринятым считать, что жизнь - это некоторое вещество с особыми свойствами.

В микроскоп живое вещество различных живых организмов выглядело практически одинаково в виде клеток с желеобразной массой (которая получила название протоплазма).

Основная задача, которую поставил перед собой Э. Бауэр – определить основные термодинамические свойства живых веществ, за которые он принимал молекулы белков в особом, неравновесном состоянии.

Несмотря на целый ряд ошибочных предположений, принципиальным научным достижением Э. Бауэра в этой работе является неопровержимое доказательство того, что живые организмы могут находиться только в устойчивом неравновесном термодинамическом состоянии.

Э. Бауэром был сформулирован «Всеобщий закон биологии» в следующей редакции:

Все и только живые системы никогда не бывают в равновесии и исполняют за счет своей свободной энергии постоянную работу против равновесия, требуемого законами физики и химии при существующих внешних условиях.

По существу этот закон является Первым законом термодинамики биологических систем.

Э. С. Бауэром также был сформулирован «Принцип устойчивого неравновесия живых систем»:

Для живых систем характерно именно то, что они за счет своей свободной энергии производят работу против ожидаемого равновесия.

Позже теория Э. Бауэра была полностью подтверждена работами И. Пригожина, Г. Хакена и Р. Тома.

Как утверждал И. Пригожин: «...и биосфера в целом, и ее различные компоненты, живые или неживые, существуют в сильно неравновесных условиях». В этом смысле жизнь, заведомо укладывающаяся в рамки естественного порядка, предстает перед нами как высшее проявление происходящих в природе процессов самоорганизации».

Однако, как было установлено автором, сформулированный Э. Бауэром «Всеобщий закон биологии» содержит две существенные ошибки.

1. Живые организмы относятся к термодинамическим системам активного типа, то есть к таким, в которых происходит преобразование энергии и которые всегда находятся в неравновесном термодинамическом состоянии. Поэтому утверждение Э. Бауэра о том, что «Все и только живые системы никогда не бывают в равновесии» не соответствует действительности.

2. К равновесному термодинамическому состоянию, требуемого законами физики, стремятся только термодинамические системы пассивного типа, что к живым организмам не относится.

3.3. Биологические ритмы как способ существования живой материи

3.3.1. Историческая справка

О существовании биологических ритмов людям известно с древних времен. Уже в «Ветхом Завете» даны точные указания о правильном образе жизни, питании, чередовании фаз активности и отдыха и ряд других рекомендаций. Об этом писали многие выдающиеся ученые древности: Гиппократ, Авиценна и другие.

Основателем хронобиологии – науки о биоритмах, принято считать немецкого врача Христофора Вильяма Гуфелянда.

В 1797 году он привлек внимание коллег на универсальность ритмических процессов в биологии: каждый день жизнь повторяется в определенных ритмах, а суточный цикл, связанный с вращением Земли вокруг своей оси регулирует жизнедеятельность всего живого, включая организм человека.

Первые серьезные научные исследования в этой области начали проводиться учеными разных стран лишь в начале 20-го века, в том числе российскими учеными И.П. Павловым, В.В. Вернадским, А.Л. Чижевским и другими.

К концу 20-го века факт ритмичности биологических процессов живых организмов стал считаться одним из фундаментальных свойств живой материи и сущностью организации жизни.

Однако природа биоритмов до последнего времени была неясна.

Как бывает в таких случаях, исследования биоритмов представляли собой процесс накопления информации, выявления свойств и закономерностей методами статистики, рассматривались вопросы практического использования.

В результате в науке о биоритмах возникло два научных направления: хронобиология и хрономедицина.

Одной из основных работ в этой области можно считать разработанную Ф. Хальбергом в 1964 году классификацию биологических ритмов.

В соответствии с этой классификацией все биоритмы подразделяются следующим образом:

- ультрадианные - с периодом меньше 20 часов;
- циркадианные - с периодом 24 ± 4 часов;
- инфрадианные - с периодом больше 28 часов.

Среди последних следует выделять:

- циркасемисептанные - с периодом примерно $3 \pm 0,5$ сут;
- циркасеptанные - с периодом 7 ± 3 сут.;
- иркадисептанные - с периодом 14 ± 3 сут.;
- ирквагинтанные - с периодом 21 ± 3 сут.;
- иркатригинтанные - с периодом 30 ± 5 сут.;
- ирканнуальные - с периодом 1 год $\pm$ 2 месяца

Ниже будет показано, что количество биоритмов на самом деле значительно больше.

Каждая клетка, каждый орган, каждая система и целостный организм имеют множество различных биоритмов, связанных с самыми разнообразными циклами обмена веществ, объединенных общим термином - метаболизм.

По поводу природы биоритмов был высказан целый ряд гипотез, производились многочисленные попытки определить их новые закономерности. Вот некоторые из них.

В 1959 году Юрген Ашофф, директор Института физиологии поведения имени Макса Планка в Андексе (Германия) обнаружил закономерность,

которая была названа «Правилем Ашоффа» (Под этим названием оно вошло в хронобиологию и историю науки).

Правило гласит: «У ночных животных активный период (бодрствование) более продолжителен при постоянном освещении, в то время как у дневных животных бодрствование более продолжительно при постоянной темноте».

И действительно, как впоследствии установил Ю. Ашофф, при длительной изоляции человека или животных в темноте цикл «бодрствование – сон» удлиняется за счет увеличения продолжительности фазы бодрствования.

Из правила Ашоффа предполагается следствие, что именно свет определяет циркадные колебания организма. Шведский исследователь Фольсгрен в опытах на кроликах обнаружил суточный ритм гликогена и желчеобразования.

Советские ученые Е. Е. Введенский, А. И. Ухтомский, а так же И. П. Павлов и В. В. Парина осуществили попытку теоретически обосновать механизмы возникновения ритмических процессов в нервной системе и показали, что ее (т.е. нервной системы) ритм определяет прежде всего ритм возбуждения и торможения.

Известные российские ученые Ф.И. Комаров и С.И. Рапопорт в своей книге «Хронобиология и хрономедицина» дают следующее определение биоритмов: «Ритм представляет собой характеристику периодической временной структуры».

Ритмичность характеризует как определенный порядок временной последовательности, так и длительность отрезков времени, поскольку содержит чередование фаз различной продолжительности».

Таким образом, до последнего времени природа и основные физиологические свойства биологических ритмов были не выяснены, хотя было понятно, что они имеют в процессах жизнедеятельности живых организмов очень большое значение.

Природу биоритмов и их основные свойства удалось установить только в результате термодинамического анализа процессов, происходящих в биологических системах.

3.3.2. Природа биоритмов. Второй закон термодинамики биологических систем

Возвращаясь к работам Э. Бауэра, рассмотренным выше, отметим, что, теоретически предположив наличие структур, обеспечивающих термодинамическое неравновесие, Э. Бауэр не установил, каким образом живые организмы постоянно поддерживают это неравновесное термодинамическое состояние.

Неравновесие означает, утверждал Э. Бауэр, что все структуры живых клеток на молекулярном уровне заранее заряжены "лишней", избыточной по сравнению с такой же неживой молекулой энергией, что выражается в неравенстве потенциалов в созданном химическом или электрическом

градиенте, тогда как в неживой замкнутой системе любые градиенты распределяются в соответствии с правилом энтропии равномерно.

Эту "лишнюю" энергию, существующую в живых клетках на любом уровне, Бауэр называет «структурной энергией» и понимает как деформацию, неравновесие в строении живой молекулы.

Для определения того, каким образом живыми системами обеспечивается состояние устойчивого неравновесия, проведем анализ термодинамических процессов, происходящих в живых организмах.

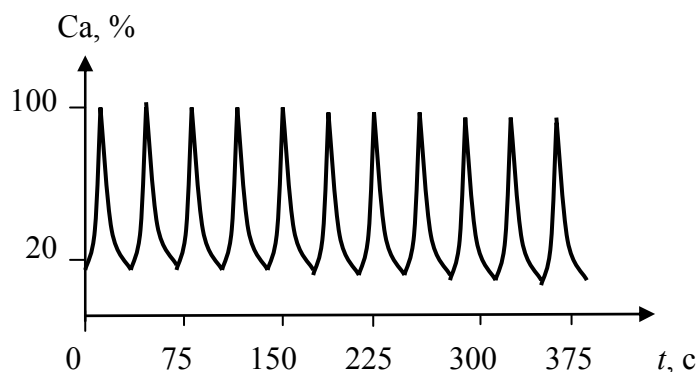


Рис. 3.3. График внутриклеточных колебаний кальция.

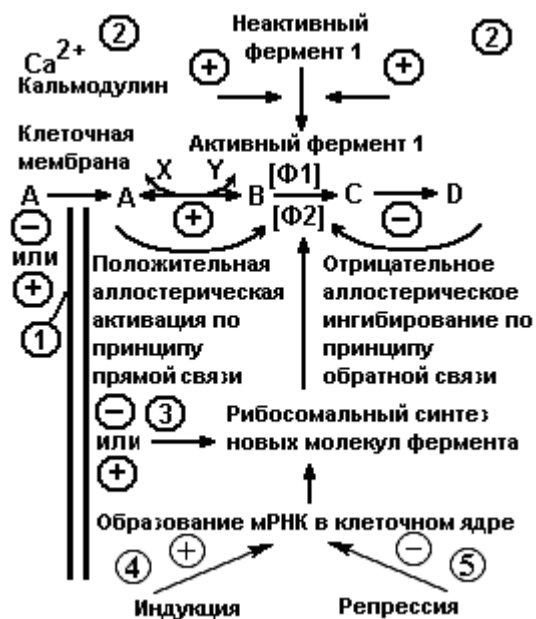


Рис. 3.4. Пример схемы регуляции ферментативных реакций.

Цифры, заключенные в кружки, указывают вероятные участки действия гормонов: 1 - изменение проницаемости мембраны; 2 - переход фермента из неактивной формы в активную; 3 - изменение скорости трансляции мРНК на рибосомальном уровне; 4 - индукция образования новой мРНК; 5 - репрессия образования мРНК.

Выше было указано, что получение свободной энергии из продуктов питания путем синтеза и расщепления АТФ для обеспечения своей жизнедеятельности живые организмы осуществляют с помощью биохимических реакций метаболизма, представляющих собой циклы обмена веществ. Эти реакции представляют собой сложные комплексы разнообразных

биохимических реакций расщепления и синтеза веществ различными метаболическими путями.

Поскольку обмен веществ происходит циклами, то в клетках в соответствии с этими циклами непрерывно и периодически изменяются концентраций веществ, участвующих в многочисленных биохимических реакциях.

На рис. 3.3 в качестве примера представлен график внутриклеточных колебаний концентрации кальция.

На рис. 3.4 приведен пример схемы регуляции ферментативных реакций.

Как видно из рис. 3.4, регуляция скорости протекания ферментативных реакций происходит посредством их активации (ускорения) и ингибирования (замедления) путем соответствующих положительных и отрицательных гормональных обратных связей.

Устойчивость неравновесного термодинамического состояния клеток обеспечивается следующим образом.

При минимальном значении неравновесного термодинамического состояния клетки датчики включают режим расщепления АТФ, в результате чего их энергетика начинает возрастать, достигая некоторого максимального значения; при максимальном значении неравновесного термодинамического состояния клетки датчики включают режим синтеза АТФ, при котором энергетика организма начинает уменьшаться.

Таким образом, устойчивость неравновесного термодинамического состояния клеток заключается в том, что величина их неравновесного термодинамического состояния всегда непрерывно колеблется в пределах, определяемых аллостерическими модуляторами и гормонами.

Количественная оценка условий и степени устойчивости неравновесного термодинамического состояния как клеток, так и органов, систем и целостного организма может быть определена с помощью методов Александра Михайловича Ляпунова, которым в конце 19-го века были разработаны общие критерии устойчивости.

Для определения условий устойчивости неравновесного термодинамического состояния биологических систем были применены методы, широко используемые при анализе условий устойчивости неравновесного термодинамического состояния систем неживой материи, так как биологические функции всегда являются непрерывными, монотонными и определяемые во всех точках.

Устойчивость состояний систем обеспечивается путем наличия в них положительных и отрицательных обратных связей. Например, для некоторой функции $y = f(x)$ условия устойчивости определяются следующими выражениями:

$$\Delta x > 0, \frac{dy}{dt} < 0 \quad (3.1)$$

$$\Delta x < 0, \frac{dy}{dt} > 0 \quad (3.2)$$

Эти условия, как было указано выше, в живых организмах определяются реакциями аллостерических модуляторов и гормонов, выполняющих функции положительных и отрицательных обратных связей.

Графически указанные функции представлены на рис. 3.5.

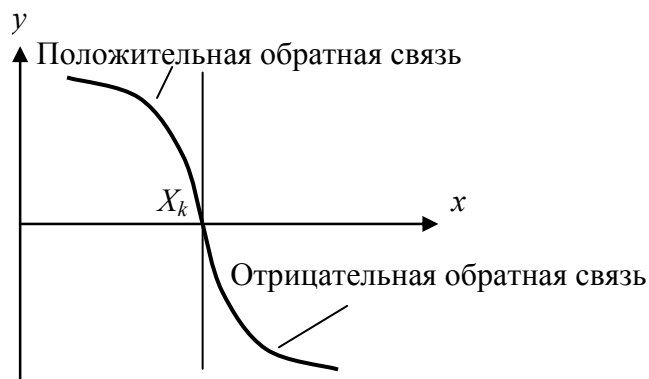


Рис. 3.5. График зависимости изменений функции y от x

Как видно из рис. 3.5, при увеличении x функция y уменьшается, а при уменьшении x функция y увеличивается, обеспечивая, тем самым, устойчивое значение параметра X в окрестности точки X_k .

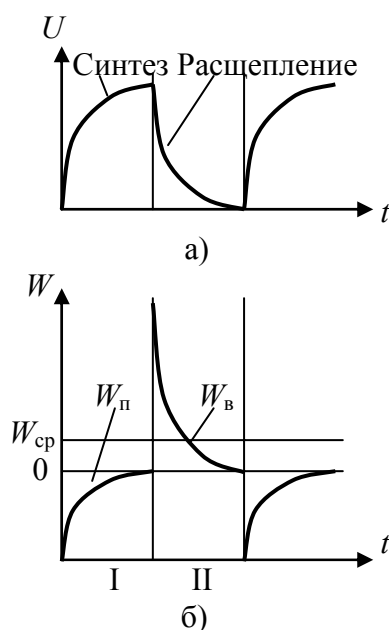


Рис. 3.6.

Графики чередований синтеза и расщепления АТФ

Величина и скорость изменения концентрации и количества ферментов, управляющих биохимическими реакциями, зависят от вида, закономерности изменений, интенсивности и длительности физико-химических и психологических нагрузок, получаемых организмом как из внутренних источников, так и из внешней среды, на которые организм в той или иной степени реагирует путем соответствующих изменений функциональных

сдвигов его физиологических параметров (частота сердечных сокращений, артериальное давление, длительность реакций на раздражители и другое).

Эти реакции происходят поочередно в зависимости от состояния внешней среды, которое в свою очередь вызывает те или иные гормональные реакции. Графики чередований синтеза и расщепления АТФ и соответствующих им чередований затрат и выделения энергии представлены на рис. 3.6.

На рис. 3.6 изображены:

- а) график чередования фаз синтеза и расщепления веществ;
- б) график чередования фаз потребления и выделения энергии;

I – фаза потребления энергии; II – фаза выделения энергии; $W_{\text{п}}$ – энергия потребления; $W_{\text{в}}$ – энергия выделения; $W_{\text{ср}}$ – среднедействующее значение выделяемой энергии.

Как видно из рис. 3.6, в результате последовательных чередований циклов биохимических реакций синтеза и расщепления АТФ соответственно протекают и термодинамические процессы затрат и выделения энергии, причем количество выделяемой энергии больше потребляемой.

Среднее значение разницы между выделяемой и потребляемой энергией равно $W_{\text{ср}} > 0$.

Величина энергии $W_{\text{ср}}$ всегда больше нуля и непосредственно зависит от реакции клетки на воздействия внутренней и внешней среды в виде ферментативной регуляции процессов синтеза и расщепления АТФ. Датчиками, определяющими скорость и характер метаболических процессов в клетках, являются аллостерические модуляторы и гормоны, непрерывно контролирующие их термодинамическое состояние.

Рассмотрим термодинамические процессы на уровне органов, систем и организма в целом на примере организма человека.

Поскольку каждая клетка представляет собой полноценный микроорганизм, находящийся в устойчивом неравновесном термодинамическом состоянии, образуемые этими клетками органы, системы и целостные организмы также находятся в устойчивом неравновесном термодинамическом состоянии.

Причем, так как все биохимические процессы в этих клетках взаимосвязаны, то функционирование органов, систем и целостных организмов обеспечивается путем соответствующих совокупных синхронных интегральных колебаний неравновесного термодинамического состояния клеток. Это находит свое выражение в периодических колебаниях физиологических параметров (функциональных сдвигов) органов, систем и целостного организма. Наглядным примером здесь может служить последовательность сокращений и расслаблений сердечной мышцы: при сокращении сердечной мышцы у входящих в нее клеток происходят синхронные процессы расщепления АТФ, а при расслаблении – процессы синтеза АТФ. Закономерность изменений функциональных сдвигов в случае их когерентности, происходит в соответствии с законом действующих масс. Поскольку состояние и функционирование всех органов и систем целостного организма так или иначе связаны между собой, воздействие любой из

возможных нагрузок, а так же их сочетаний, вызывает разнообразные функциональные сдвиги во всех органах и системах организма в соответствии с видом, величиной, длительностью и другими параметрами нагрузок.

Таким образом, величина изменения каждого функционального сдвига u_j может быть представлена в виде системы дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{du_1}{dt} = k_1 f(s_i, w_i, T_{wi}, \dots) \\ \frac{du_2}{dt} = k_2 f(s_i, w_i, T_{wi}, \dots) \\ \dots\dots\dots \\ \frac{du_j}{dt} = k_j f(s_i, w_i, T_{wi}, \dots) \end{array} \right., \quad (3.3)$$

где k_j – корректирующий коэффициент, s_i – вид нагрузки, w_i – величина нагрузки, T_{wi} – длительность воздействия нагрузки и т.д.

В зависимости от параметров нагрузок в организме человека возникает множество различных функциональных сдвигов.

Однако для каждого вида нагрузок характерны определенные группы основных функциональных сдвигов, в наибольшей степени реагирующих на соответствующие виды нагрузок и в основном определяющие состояние организма, чем все остальные, а их величины в первую очередь отражают уровни нагрузок и длительности их воздействия.

В случае воздействия на организм одной нагрузки закономерность роста вызванных ею основных функциональных сдвигов можно представить в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{du_1}{dt} = n_1 w T_w \\ k \frac{du_2}{dt} = n_2 w T_w \\ \dots\dots\dots \\ k \frac{du_j}{dt} = n_j w T_w \end{array} \right., \quad (3.4)$$

где: $u_1, u_2, \dots u_j$ – основные функциональные сдвиги, $n_1, n_2, \dots n_j$ – коэффициенты пропорциональности.

В случае одновременного воздействия нескольких нагрузок в зависимости от их свойств, сочетаний, величины и характера воздействия, состав и величины основных функциональных сдвигов могут меняться в ту или иную сторону. При этом коэффициенты $n_1, n_2, \dots n_j$ станут функциями от s_i и w_i :

$$n_1 = f(s_1, s_2, \dots, s_z; w_1, w_2 \dots w_z) \quad (3.5)$$

$$n_2 = f(s_1, s_2, \dots, s_z; w_1, w_2 \dots w_z) \quad (3.6)$$

Отсюда следует, что, меняя в определенных пределах параметры одной из нагрузок и контролируя изменения при этом всех основных функциональных сдвигов, возможно, при соответствующей статистической обработке, определение и количественный учет коэффициентов $n_1, n_2, \dots, n_j$, и, тем самым, значимость каждой из нагрузок.

Здесь необходимо отметить, что при последовательных циклах сокращения и расслабления сердечной мышцы в этих процессах статистически достоверно одновременно, интегрировано и синхронно происходят соответствующие биохимические реакции у огромного количества клеток, каждая из которых в составе сердечной мышцы выполняет свою роль. При этом частота сердечных сокращений определяется термодинамическим состоянием всего организма и может колебаться в зависимости от испытываемой организмом нагрузки в достаточно больших пределах. Аналогично происходят соответствующие колебательные процессы в системе дыхания, центральной нервной системе и других.

Анализируя любые физиологических процессы, нетрудно убедиться, что отнюдь не все клетки, вовлеченные в эти процессы, ведут себя как солдатики, четко выполняя предписанную им роль.

В живых организмах, являющихся открытыми термодинамическими системами, непрерывно происходят различные необратимые процессы, поэтому условия существования и жизнедеятельности каждой клетки непрерывно меняются и соответственно меняются (перераспределяются) их роли в интегральных процессах, происходящих в органах и системах.

Однако статистически, в результате действия большого количества клеток, они в конечном итоге производят те действия, для которых предназначены, в данном случае последовательные сокращения и расслабления сердечной мышцы в необходимом ритме.

На воздействие нагрузок наиболее четко и оперативно реагирует сердечно-сосудистая система, так как остановка ее работы даже на несколько минут может привести к гибели организма.

Несколько свободнее, но в достаточно жестких пределах работает система органов дыхания, периодические процессы которой человек может в незначительной степени сознательно регулировать.

В еще более свободном режиме колебаний работают некоторые центры головного мозга, система пищеварения и другие.

Человек может позволить себе в определенных пределах нарушать ритм сна и бодрствования, ритмы потребления пищи и некоторые другие. Однако допустимая величина всех этих нарушений в значительной степени зависит от общего состояния организма и от условий окружающей среды.

Поскольку органы и системы выполняют самые различные функции, то периоды колебаний параметров этих органов и систем, а также закономерности изменений этих колебаний могут быть самыми разными.

При восприятии импульсов света или звука периоды колебаний составляют доли секунд.

При некоторых видах труда периоды вызванных ими колебаний (в сочетании с другими колебаниями) могут составлять сутки, недели и даже месяцы.

При этом, независимо ни от чего, все виды физиологических колебаний представляют собой непрерывные последовательности циклов, соответствующие энергетическим колебаниям потребления и выделения энергии. Отсюда следует, что принцип обеспечения устойчивости неравновесного термодинамического состояния живых организмов (биологических систем) как на уровне клеток, так и на уровне органов, систем и целостных организмов заключается в непрерывных чередованиях потребления и выделения энергии посредством управляемых на соответствующих уровнях циклов синтеза и расщепления АТФ.

На основании изложенного сформулируем Второй закон термодинамики биологических систем:

Устойчивость неравновесного термодинамического состояния биологических систем обеспечивается непрерывным чередованием фаз потребления и выделения энергии посредством управляемых реакций синтеза и расщепления АТФ соответственно

Из этого закона вытекают следующие следствия:

1. В живых организмах ни один процесс не может происходить непрерывно, а должен чередоваться с противоположно направленным: вдох с выдохом, работа с отдыхом, бодрствование со сном, синтез веществ с их расщеплением и т.д.

2. Состояние живого организма никогда не бывает статическим, а все его физиологические и энергетические параметры всегда находятся в состоянии непрерывных колебаний относительно средних значений, как по частоте, так и по амплитуде

Отсюда следует, что описанные выше физиологические колебания живых организмов, уже многие тысячи лет наблюдаемые человечеством, и являются биоритмами.

Таким образом, природой биоритмов живых организмов являются непрерывные чередования фаз потребления и выделения энергии посредством управляемых реакций синтеза и расщепления АТФ, направленные на обеспечение устойчивого неравновесного термодинамического состояния биологических систем. Причем циклические колебания энергии света, связанные с вращением Земли, принудительно вызывают соответствующие энергетические колебания в биохимических реакциях клеток растений,

стимулируя тем самым их жизнедеятельность. Таким образом, есть основания полагать, что происхождение жизни на Земле непосредственно связано с чередованием света и темноты.

3.3.3. Собственная и принудительная частота биоритмов

Как следует из предыдущих материалов, в живых организмах жизнедеятельность каждой клетки, каждого органа, каждой системы и целостного организма характеризуются соответствующими комплексами биологических ритмов. Причем параметры этих ритмов находятся в тесной взаимосвязи и определяются как внутренними свойствами соответствующих элементов организма, так и их ролью в составе того или иного органа или системы, а также средой обитания.

Например, частота сердечных сокращений у человека в спокойном состоянии составляет 58 – 75 уд/мин., а при большой нагрузке она может достигать до 160 и более. В то же время циклы биохимических реакций, связанных с перевариванием пищи, происходят, например, от 3 до 5 раз в сутки, в зависимости от режима питания.

Поскольку каждый живой организм по-своему уникален, то для него будет характерен соответствующий только ему оптимальный образ жизни: время сна и бодрствования, режим и состав питания, соответствующая окружающая среда, необходимые физические нагрузки и многое другое. В связи с этим для такого живого организма будут характерны и соответствующие только ему биологические ритмы физиологических параметров.

Однако в реальной жизни такой режим невозможен, так как он не может существовать в отрыве от условий окружающей его обстановки. Каковы же условия этой обстановки?

Одним из основных условий является период цикла сон-бодрствование, равный 24 часам. Это условие определяется периодом вращения Земли вокруг своей оси. Другим основным условием является то, что человек живет в обществе, в связи с чем он должен подчиняться его правилам, в частности режиму дня, времени работы и отдыха, времени приема пищи и так далее.

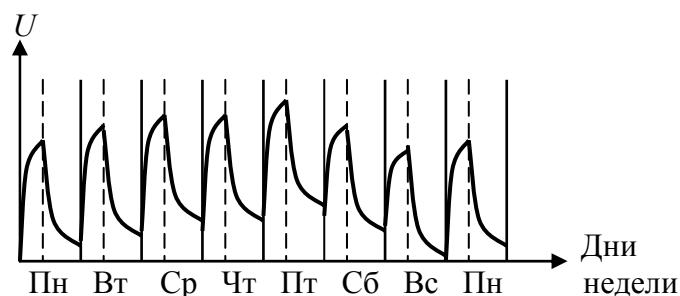


Рис. 3.7. Идеализированные типовые колебания функциональных сдвигов организма человека.

Поэтому в большинстве случаев определенные параметры биоритмов для каждого организма являются принудительными.

На рис. 3.7 представлен пример идеализированных типовых колебаний функциональных сдвигов организма человека, являющихся обобщением биоритмов таких физиологических параметров, как температура тела, артериальное систолическое и диастолическое давление, реакции на свет и звук, частота сердечных сокращений.

Как видно из рис. 3.7, обобщенные периодические колебания функциональных сдвигов организма человека носят как суточный, так и недельный характер.

Каким же образом в организме человека происходит согласование собственных и принудительных параметров биоритмов?

Здесь необходимо обратить внимание на то, что все процессы, происходящие в организме человека в условиях собственных биоритмов, являются абсолютно необходимыми для его жизнедеятельности, так как иначе будет происходить накопление значений невозстанавливающихся функциональных сдвигов. А это может привести к потере работоспособности, заболеваниям и в конечном итоге к гибели.

Как видно из графика на рис. 3.6, при принудительной интенсивной работе в течение рабочей недели у человека происходят накопления остаточных функциональных сдвигов, которые успевают полностью восстановиться только за дни отдыха. В случае отсутствия необходимых условий для отдыха значительные функциональные сдвиги приведут организм к заболеваниям.

Поэтому принудительные периоды биоритмов биохимических процессов циклов сна и бодрствования, режима труда и отдыха, режима питания и других циклов корректируются организмом таким образом, чтобы все необходимые для его жизнедеятельности функции укладывались в эти принудительные рамки.

В частности, человек должен определять для себя вид трудовой деятельности, время и продолжительность сна, вид отдыха, ассортимент продуктов питания, занятия спортом и многое другое.

Кроме того, указанная коррекция в значительной степени происходит также за счет способности организма к фенотипической адаптации. Как показывают многочисленные исследования в области хронобиологии и хрономедицины, свойства живых организмов, и в частности человека, к коррекции собственных биоритмов всегда очень индивидуальны.

Глава 4. Теоретические основы адаптации

4.1. Общие сведения об адаптации

Как было показано в главе 3, в результате воздействия внешней среды материя принимает те или иные формы своего существования, то есть происходит ее самоорганизация.

Также было показано, что в этих процессах у неживой материи отсутствует факт какого-либо развития - неживая материя лишь принимает те или иные формы своей организации в зависимости от собственных свойств и свойств окружающей среды.

Однако совсем другими свойствами самоорганизации обладает живая материя. В зависимости от изменений окружающей среды она не только меняет свою структуру, но и приобретает качественно новые свойства, обеспечивающие возможность ее жизнедеятельности в самых разных условиях. Ярким примером приобретения таких свойств является переход от термонестабилизированных живых организмов – холонокровных, к термостабилизированным живым организмам - теплокровным. Это свойство живых организмов обозначается термином «адаптация» со следующим определением:

Адаптация – свойство приспособления живого организма к постоянно изменяющимся условиям существования во внешней среде, выработанного в процессе эволюционного развития.

Проблемам адаптации посвящено большое количество работ, в основном содержащих факты либо различные теории, предлагающие те или иные научные объяснения наблюдаемым процессам. В частности этой теме было посвящено большое внимание таких ученых, как П. К. Анохина, Ф. З. Меерсона и многих других.

Известно два типа адаптации: генотипическая и фенотипическая.

По определению Большой медицинской энциклопедии (БМЭ): «...генотипическая адаптация возникает вследствие отбора клеток с определенным генотипом, обуславливающим выносливость».

Это определение нельзя признать безупречным, так как оно не отражает того, к какому виду нагрузок относится выносливость, так как в большинстве случаев, приобретая одни преимущества, живые организмы теряют другие.

Если, например, растение хорошо переносит жаркий засушливый климат, то, скорее всего, оно будет плохо переносить холодный и влажный. Что же касается фенотипической адаптации, то к настоящему времени так же нет строгого определения этого термина.

По определению БМЭ «... фенотипическая адаптация возникает как защитная реакция на действие повреждающего фактора».

По определению Ф. З. Меерсона «Фенотипическая адаптация – развивающийся в ходе индивидуальной жизни процесс, в результате которого организм приобретает отсутствующую ранее устойчивость к определенному фактору внешней среды и таким образом получает возможность жить в условиях, ранее не совместимых с жизнью, ...».

Известны также аналогичные определения адаптации и других авторов.

Можно утверждать, что ни определение, данное в БМЭ, ни определение Ф. З. Меерсона не отражает в полной мере свойства живых организмов к фенотипической адаптации.

Действительно, если проанализировать определение фенотипической адаптации, данной в БМЭ, то становится очевидным, что ограничение процесса

адаптации только наличием повреждающего фактора, по всей видимости, необоснованно.

В том случае, когда действует такой неповреждающий фактор, как, например, питьевая вода с другим содержанием солей, к которой нужно привыкнуть, либо переезд в зону другого часового пояса, либо в других аналогичных ситуациях, то при этом организм также должен перестраиваться благодаря собственным свойствам фенотипической адаптации. Что касается определения, данного Ф.З. Меерсоном, то оно недостаточно широко охватывает область, в которой проявляется фенотипическая адаптация, так как, приобретая устойчивость к одному, организм с течением времени определенного времени может потерять устойчивость к другому.

Причина неоднозначности определений генотипической и фенотипической адаптаций заключается в том, что в определении этих понятий отсутствует основной критерий жизнеспособности организмов – устойчивость их неравновесного термодинамического состояния.

Поэтому для обеспечения однозначности и полноты содержания этих терминов предлагаются следующие редакции определений генотипической и фенотипической адаптаций:

Генотипическая адаптация - изменение генофонда вида путем естественного отбора по показателю максимальной устойчивости его неравновесного термодинамического состояния.

Фенотипическая адаптация - свойство организма изменять свои биологические параметры при постоянно изменяющихся условиях внешней среды для обеспечения устойчивости неравновесного термодинамического состояния.

Проблемы генотипической адаптации в основном связаны с условиями окружающей среды применительно для каждого вида.

При этом наилучшие шансы для выживания имеют те популяции видов, которые могут наиболее оперативно изменять свои генетические свойства в условиях тех или иных изменений параметров окружающей среды. Свойства генотипической адаптации по-существу представляют собой функции распределения плотности вероятности генетических и соответствующим им физиологических свойств, которые являются определяющими для соответствующих изменений условий окружающей среды.

Что же касается фенотипической адаптации, то ее процессы условно могут быть разделены на два вида:

1. Оперативную фенотипическую адаптацию, в результате которой организм путем соответствующих оперативных физиологических реакций непрерывно реагирует на все кратковременные факторы, влияющие на его жизнедеятельность, не меняя при этом их средние значения.

2. Устойчивую фенотипическую адаптацию, в результате которой при длительных воздействиях на организм факторов окружающей среды произошли такие изменения средних значений его функциональных систем, в результате которых организм стал более приспособлен к этим факторам.

Ниже будут рассмотрены вопросы определения природы адаптации и ее основных законов путем анализа биологических процессов исходя из принципов жизнедеятельности живых организмов как открытых термодинамических систем, находящихся в устойчивом неравновесном термодинамическом состоянии.

4.2. Сущность процессов фенотипической адаптации

Как было установлено Вторым законом термодинамики биологических систем, устойчивость неравновесного термодинамического состояния этих систем обеспечивается непрерывным чередованием фаз потребления и выделения энергии посредством управляемых реакций синтеза и расщепления АТФ. Однако наряду с реакциями синтеза и расщепления АТФ в живых организмах происходит большое количество и других жизненно важных биохимических реакций в виде различных циклов обмена веществ - метаболизма. Время выполнения полного цикла биохимических реакций определяется наименьшим средним значением скорости реакции в каждой фазе цикла.

Причем параметры процессов биохимических реакций в клетках не являются постоянными. Наоборот, они непрерывно меняются как по каким-либо внутренним причинам, так и из-за непрерывно меняющихся внешних воздействий окружающей среды. При любом воздействии на клетку: изменении параметров окружающей среды, состава продуктов питания и других, в ответ в ней происходят многочисленные изменения в биохимических реакциях и физическом состоянии, направленные на поддержание ее жизнеспособности – обеспечение устойчивости ее неравновесного термодинамического состояния.

В частности, это выражается в изменениях скоростей чередования циклов метаболических процессов, объемов веществ, вступающих в реакции, скорости поступления продуктов питания и других ингредиентов, периода деления клеток, энергетического потенциала, среднего времени жизни, содержания и скоростей выполнения других жизненных процессов, а также массы и геометрических параметров. Такие реакции в ряде случаев могут обеспечивать жизнеспособность живых организмов при изменениях параметров внешней среды в очень больших пределах: на высоте более 80 километров над уровнем моря и на одиннадцатикилометровой глубине в океане при давлении в тысячу атмосфер, в шахтах на глубине 4 километра, в безжизненных пустынях и в самом соленом из озер - Мертвом море, в контурах ядерных реакторов, при очень низких концентрациях питательных веществ и других условиях.

Следует отметить, что элементы клеток: плазматическая мембрана, органеллы и другие по своим физическим характеристикам достаточно пластичны. Поэтому в процессе жизнедеятельности при воздействии нагрузок их размеры и формы непрерывно меняются в определенных пределах, зависящих от величины и характера этих нагрузок.

Свойства фенотипической адаптации многоклеточных живых организмов определяются совокупными свойствами клеток, органов и систем, из которых

они состоят, реагировать на те или иные нагрузки. Примеры внешних проявлений фенотипической адаптации уже были приведены выше.

Исходя из изложенного, можно сформулировать сущность свойства живых организмов к фенотипической адаптации в следующей редакции:

Свойство к фенотипической адаптации живых организмов основано на периодичности чередования фаз выделения и потребления энергии и заключается в физических и биохимических изменениях в клетках, органах и организме в целом, направленных на сохранение устойчивого неравновесного термодинамического состояния при изменениях параметров внешней среды

4.3. Принципы работы механизма фенотипической адаптации

Для анализа работы механизма фенотипической адаптации рассмотрим в качестве примера поведение клетки при воздействии на нее некоторой нагрузки.

При воздействии нагрузки для сохранения устойчивости своего неравновесного термодинамического состояния клетке будет необходимо увеличить объем и скорости синтеза и расщепления АТФ.

Одновременно с этими изменениями реакций в клетках изменяются и многие другие, включенные в соответствующие метаболические пути.

При воздействии на клетку такой нагрузки в ней будут активизированы ферменты, функции которых заключаются в повышении скорости биохимических реакций в первой фазе – фазе поступления питательных веществ и синтеза из них АТФ.

Эта фаза под действием ферментов будет происходить в ускоренном режиме до достижения увеличенного количества синтезированного АТФ.

При достижении в клетке критического количества АТФ фаза синтеза АТФ за счет действия обратных связей переключится на фазу расщепления АТФ.

При фазе расщепления АТФ идут совершенно другие реакции, в основном реакции гидролиза, в результате которых АТФ превращается в АДФ с выделением энергии.

Эти реакции также будут идти в ускоренном режиме до достижения минимального количества АТФ.

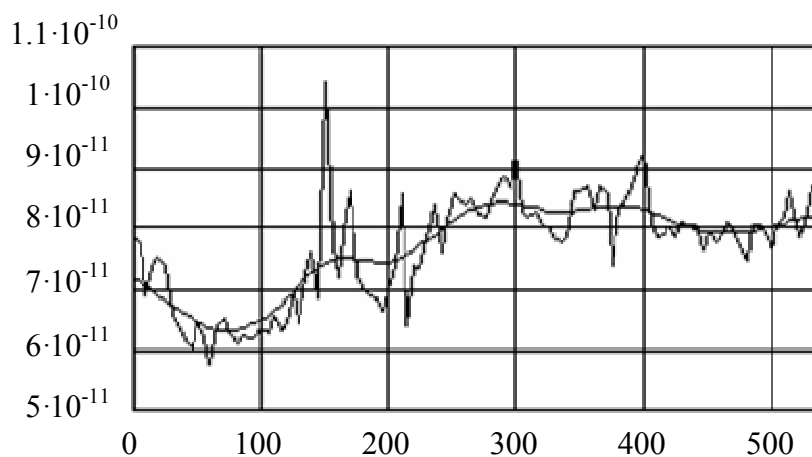


Рис. 4.1. График изменения массы нейтрофила.
Ось абсцисс: минуты; ось ординат: граммы

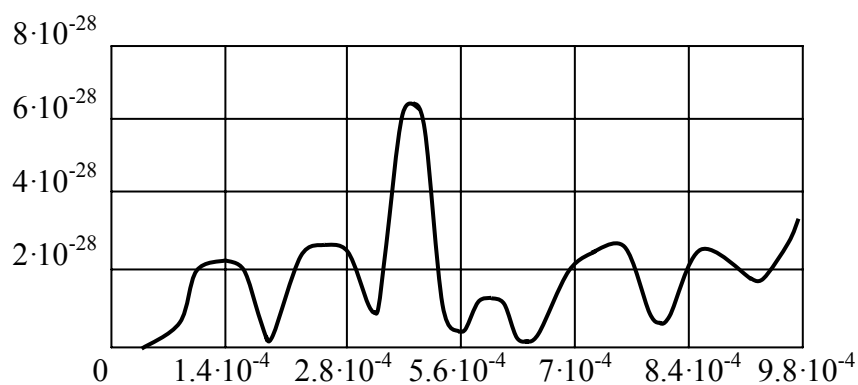


Рис. 4.2. График спектральной плотности массы клетки.
Ось абсцисс: Гц; ось ординат: $\text{г}^2/\text{Гц}$

Указанные реакции, проходящие при участии и под контролем ферментов, будут также сопровождаться усиленным синтезом последних.

Изменения в ходе биохимических реакций приводят к биологическим и к физическим изменениям клетки: скоростей и объема реакций, массы, формы, геометрических размеров. На рис. 4.1 и 4.2 приведены графики изменений массы нейтрофилов и спектральной плотности массы.

В том случае, если нагрузка невелика и действует на клетку незначительное время, то после ее снятия все параметры клетки (как параметры биохимических реакций, так и физические), быстро вернуться к первоначальному состоянию. Как было указано выше, такой вид фенотипической адаптации является оперативным.

На рис. 4.3 представлен пример оперативной фенотипической адаптации.

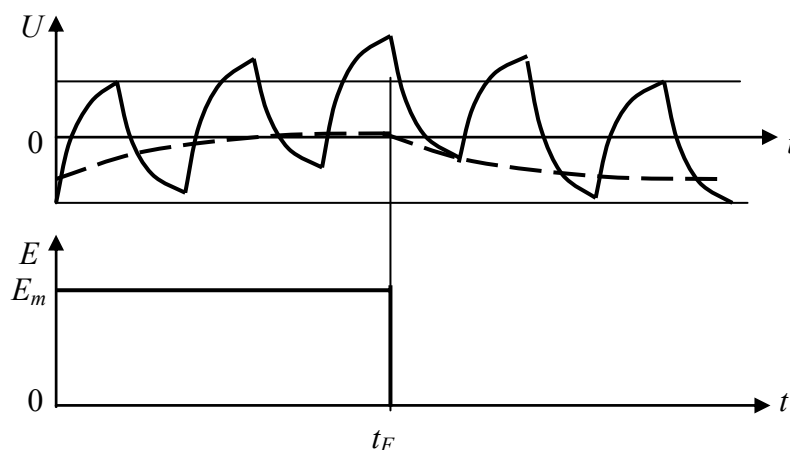


Рис. 4.3. Пример оперативной фенотипической адаптации.

Как видно из рис. 4.3, в течение времени t_F действия нагрузки E_m происходит функциональный сдвиг процесса колебаний физиологического параметра u .

После прекращения действия нагрузки функциональный сдвиг восстанавливается в исходное состояние.

Но если нагрузка действует продолжительное время, то, благодаря циклическому характеру процессов обмена веществ, в клетке постепенно произойдут устойчивые изменения ее физических и биохимических параметров: изменятся геометрические размеры и масса, пределы регуляции биохимических реакций, скорость деления и другие.

При снятии после таких изменений нагрузки на длительный срок, благодаря тому же циклическому характеру процессов обмена веществ, в клетке за достаточно продолжительное время произойдет устойчивый возврат к исходным параметрам.

В этом нетрудно убедиться на примере тренировок спортсменов.

В результате длительных тренировок у них практически всегда наблюдается значительное увеличение мышечной массы. Однако, если тренировки прекращаются, то мышечная масса со временем возвращается к своим прежним параметрам. При биохимических и физических изменениях в клетках, не превышающих предельно допустимые, фенотипические адаптационные процессы в них можно считать условно обратимыми. Это связано с тем, что, как было указано выше, вся материя представляет собой открытые термодинамические системы и все процессы, происходящие в материальном мире, необратимы.

Действительно, возврат организма к исходным параметрам в принципе может произойти и происходит, но уже при другом его состоянии. За время фенотипической адаптации и ее возвращения к исходным параметрам организм в определенной степени изменится, в частности, станет несколько старше.

В его органах и системах за это время успевают совершиться определенные изменения, биохимические реакции произойдут иначе из-за приема другой пищи, погоды и массы других параметров внешней среды, которые также непрерывно меняются.

Рассматривая процессы перестройки многоклеточных организмов, необходимо отметить, что они в той или иной степени, но всегда затрагивают абсолютно все органы и системы.

Так же следует отметить, что эти органы и системы обладают самыми разными свойствами реакций на нагрузки. Некоторые органы и системы реагируют на воздействие нагрузок очень быстро, например, сердечно-сосудистая система, а некоторые очень медленно, как уже упоминавшийся процесс изменения мышечной массы.

Поэтому объем процессов перестроек в организме под действием нагрузок в значительной степени зависит как от длительности воздействия этих нагрузок, так и от их характера.

4.4. Основные закономерности реакций на нагрузки

4.4.1. Закон действующих масс

Закон действующих масс описывает закономерность скорости протекания химических реакций в зависимости от концентрации реагентов.

Для одностадийной гомогенной реакции $a + b \rightarrow c$, этот закон может быть выражен дифференциальным уравнением, отображающим изменение скорости химической реакции в зависимости от концентраций реагентов c_a и c_b :

$$\frac{dc_a}{dt} = \frac{dc_b}{dt} = kc_a c_b \quad (4.1)$$

где c_a и c_b – концентрации веществ a и b , моль/л; k – коэффициент пропорциональности (константа скорости реакции)

Как видно из уравнения (4.1), скорость химической реакции пропорциональна концентрациям ингредиентов c_a и c_b .

Общий вид графика изменения скорости химических реакций в соответствии с уравнением (4.1) имеет вид, представленный на рис. 4.4.

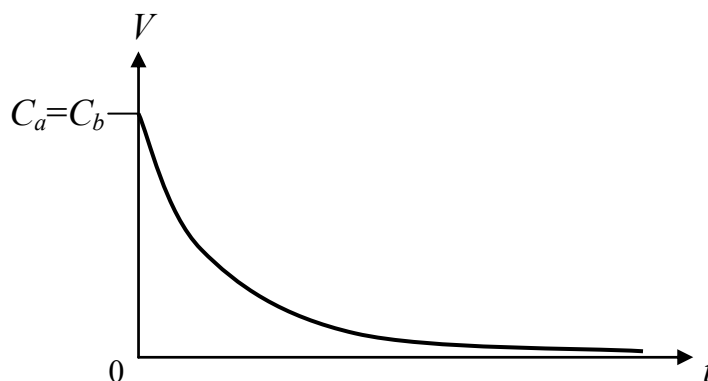


Рис. 4.4. График изменения скорости химических реакций

Для определения закономерности изменения концентрации продукта C_c , получаемого в результате химической реакции, составим систему уравнений:

$$\begin{cases} kC_a \cdot C_b = v \\ C_a + C_b = C_c \end{cases} \quad (4.2)$$

где:

$$v = \frac{dC_a}{dt} \quad (4.3)$$

Отсюда:

$$C_c = \frac{v + kC_a^2}{kC_a} \quad (4.4)$$

Из (4.4) очевидно, что при $v \rightarrow 0$

$$C_c \rightarrow C_a = C_b \quad (4.5)$$

График изменения концентрации C_c в результате указанной выше реакции имеет вид, представленный на рис. 4.5:

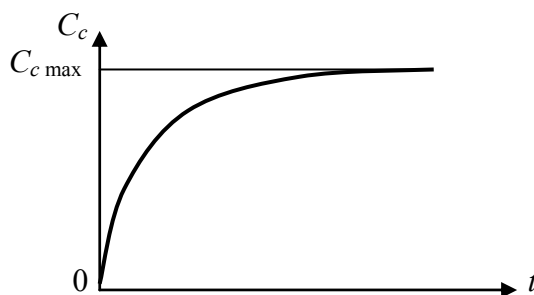


Рис. 4.5. Изменение концентрации продукта C_c , моль/л.

Как видно из рис. 4.5, в процессе химической реакции концентрация $C_c \rightarrow C_{c \text{ max}}$.

При биохимических реакциях в живых организмах скорость и закономерность каждой биохимической реакции в значительной степени зависит от активности ферментов, выполняющих как роль катализаторов, так и ингибиторов, непосредственно и непрерывно влияющих на ход этих реакций, но при установившемся процессе в конечном итоге они так же подчиняются закону действующих масс.

4.4.2. Реакции на одиночную нагрузку

Выше уже отмечалось, что воздействия на клетки различных нагрузок приводят к соответствующим изменениям в ходе происходящих в них реакций, а также к биологическим и физическим изменениям: скорости и величине реакций, массы, объема, формы, геометрических размеров. Для определения закономерности зависимости таких реакций от нагрузки рассмотрим воздействие на организм одиночной нагрузки в виде прямоугольного импульса.

На рис. 4.6 представлен упрощенный график закономерности изменений некоторого функционального сдвига u при воздействии на организм импульсной нагрузки E_1 прямоугольной формы, действующей в течение промежутка времени $T = t_2 - t_1$. Здесь следует отметить, что на самом деле живой организм всегда реагирует не только на величину нагрузки, но и на скорость ее нарастания. Кроме того, в природе в принципе не бывает импульсов абсолютно прямоугольной формы - всегда есть передний и задний фронты, меняющиеся по определенным законам, с определенными конечными параметрами.

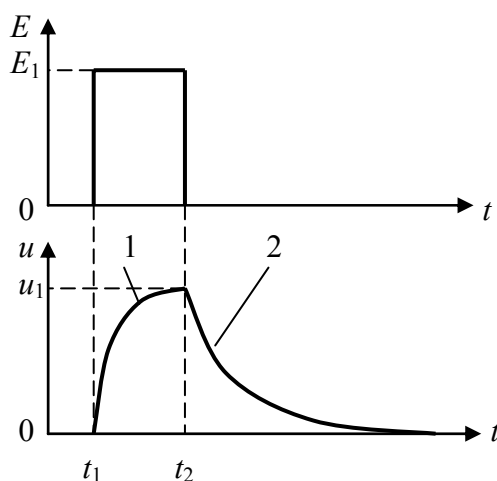


Рис. 4.6. Упрощенный график закономерности изменений функционального сдвига u при воздействии импульсной нагрузки прямоугольной формы E_1 .

Как видно из рис. 4.6, при воздействии на организм нагрузки E_1 длительностью $T = t_2 - t_1$, в организме возникает и начинает нарастать некоторый функциональный сдвиг u , который достигает своего максимального значения u_1 в момент прекращения действия нагрузки t_2 (кривая 1).

После снятия нагрузки E_1 функциональный сдвиг u восстанавливается до исходного значения (кривая 2). Наблюдаемая закономерность изменений функционального сдвига, изображенного на графике рисунка 4.6, является результатом большого комплекса биохимических ферментативных реакций, вызванных воздействием нагрузки E_1 .

Попытка математического описания таких реакций была предпринята еще в 1913 году немецкими учёными Л. Михаэлисом и М. Ментеном.

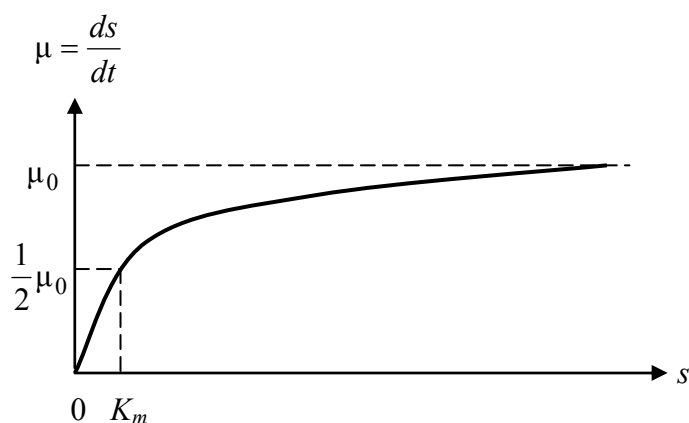


Рис. 4.7. Закон Михаэлиса-Ментен.

Зависимость скорости реакции как функции начальной концентрации субстрата s , μ_0 - максимальная скорость, K_m - константа Михаэлиса.

В результате проведенных исследований ими были выведен закон, описывающий кинетику изменения субстрата в ферментативной реакции (закон Михаэлиса-Ментен):

$$\frac{ds}{dt} = -\frac{\mu_0 s}{K_m + s}, \quad (4.6)$$

где: s - концентрации субстрата; μ_0 - максимальная скорость; K_m - константа Михаэлиса

График зависимости скорости реакции как функции начальной концентрации субстрата s представлен на рис. 4.7.

Однако закон Михаэлиса-Ментен описывает только одну каталитическую реакцию и то при нескольких не совсем реальных допущениях, в частности таких, как отсутствие в растворе других форм фермента. В нашем же случае необходимо анализировать закономерность изменений функционального сдвига как конечного совокупного результата всего комплекса биохимических реакций, участвующих в его формировании. В связи с этим для описания совокупного реального процесса реакций организма на некоторую единичную нагрузку (рис. 4.6), выражающуюся в росте соответствующего функционального сдвига и реакции восстановления этого сдвига после снятия нагрузки, могут быть использованы математические формулы, составленные по результатам практических исследований этих процессов и построения соответствующих графиков.

В частности, закономерность нарастания функционального сдвига u (рис. 4.6, кривая 1) может быть описана формулой (4.7.).

В свою очередь процесс восстановления функционального сдвига u_1 в сторону исходного состояния (рис. 4.6, кривая 2) может быть описан формулой (4.8):

$$u = u_1(1 - e^{-kt}) \quad (4.7)$$

$$u = u_1 e^{-kt} \quad (4.8)$$

Как видно из формулы (4.7), $u \rightarrow u_1$ при $t \rightarrow \infty$.

Как видно из формулы (4.8), $u \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$.

Отсюда следует, что определить точное время роста функционального сдвига t , при котором $u = u_1$ и время восстановления функционального сдвига t , при котором $u = 0$, невозможно.

При определенных изменениях величины нагрузки E_1 и длительности ее воздействия T соответствующим образом будет меняться закономерность роста и восстановления функционального сдвига u , так как при этом в биохимических реакциях будет принимать участие различное количество ингредиентов с соответствующей динамикой концентрации.

Рассмотрим зависимость изменений функциональных сдвигов u от изменения величины нагрузки E .

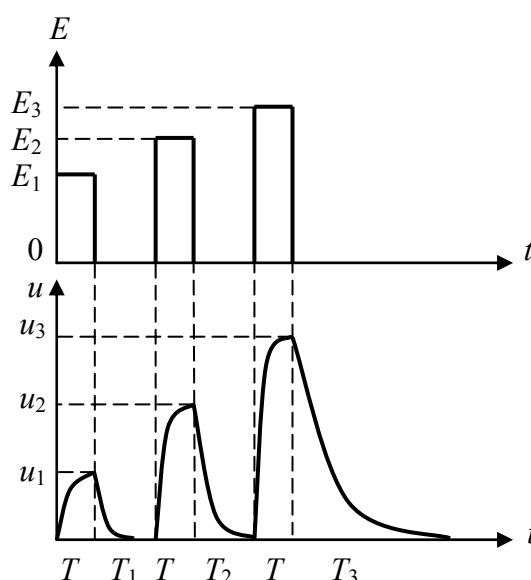


Рис. 4.8. Зависимость изменений функциональных сдвигов u от изменения величины нагрузки E .

На рис. 4.8 показаны закономерности изменений функциональных сдвигов u при разной абсолютной величине нагрузки E . Как видно из рис. 4.8, с увеличением абсолютной величины нагрузки E , действующей в течение равных промежутков времени T , величина функциональных сдвигов u возрастает. При этом возрастает и время их восстановления.

Далее рассмотрим зависимость изменений величины функциональных сдвигов u от длительности действия нагрузки E .

На рис. 4.9 показаны закономерности изменений функциональных сдвигов u при разном времени действия нагрузки E .

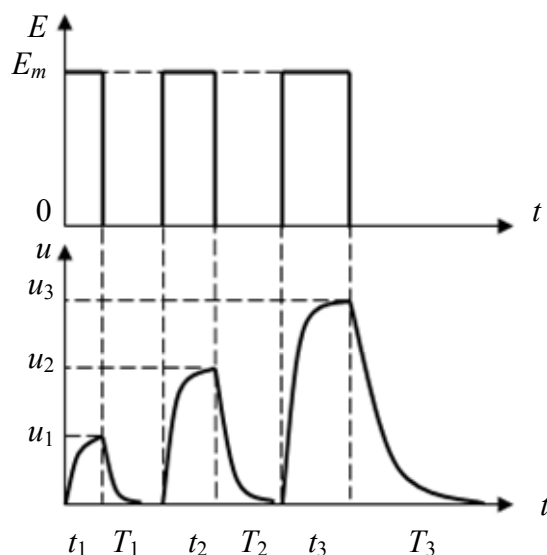


Рис. 4.9. Зависимость изменений величины функциональных сдвигов u от длительности действия нагрузки E_m .

Как видно из рис. 4.9, с увеличением длительности воздействия t одинаковой по величине нагрузки E_m величина функциональных сдвигов u возрастает. При этом возрастает и время их восстановления.

Таким образом, время восстановления T функциональных сдвигов u зависит как от величины нагрузки E , так и от длительности ее воздействия t . Величина и длительность действия нагрузок на организм могут быть различными, но они всегда ограничены по максимальным значениям. В зависимости от величины нагрузки соответствующим образом меняются процессы биохимических реакций, и как следствие - физиологические процессы. При незначительных нагрузках, как по величине, так и по времени действия, к которым организм в достаточной степени приспособлен (назовем их нормальными), вызванные ими функциональные сдвиги после снятия нагрузок быстро восстанавливаются до исходных значений. При максимально большой или максимально длительной нагрузке за счет ферментов изменения скорости биохимических реакций и объема участвующих в них реагентов достигают предельных значений.

После снятия таких нагрузок организму требуется достаточно большое время для восстановления вызванных ими функциональных сдвигов.

При воздействиях на организм нагрузок, превышающих предельно допустимые, достаточно велика вероятность повреждений, заболеваний или гибели организма. При этом, как правило, не происходит полного восстановления функционального сдвига.

На рис. 4.10 показан пример графика реакции функционального сдвига на непереносимую нагрузку (шум от взрыва), вызвавшую акустическую травму, и процесс восстановления слуха после такой травмы.

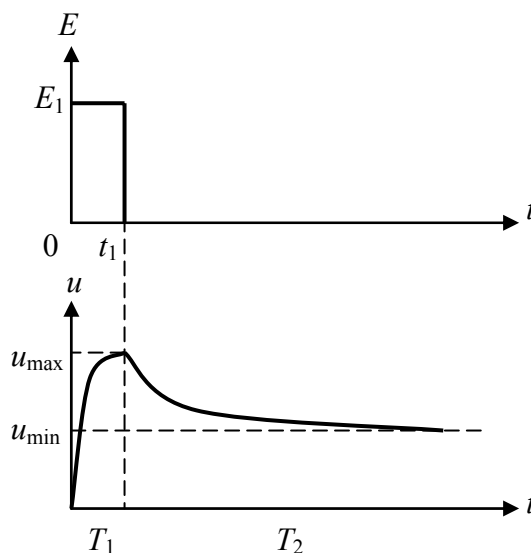


Рис. 4.10. График реакции функционального сдвига на непереносимую нагрузку

Как видно из рис. 4.10, график роста функционального сдвига u при воздействии непереносимой нагрузки (кривая I) представляет собой крутую характеристику, переходящую в верхней части в горизонтальную линию, свидетельствующую о переходе реакции в режим предельного значения функционального сдвига $u_{\max}$, следствием которого стала акустическая травма.

Процесс восстановления функционального сдвига (кривая II) – восстановления слуха после акустической травмы – происходит лишь частично, до уровня $u_{\min}$.

Таким образом, нагрузки, воздействующие на организм, можно разделить на три категории: нормальные, повышенные и непереносимые со следующими определениями: нормальные нагрузки – не вызывающие каких-либо последствий; повышенные нагрузки – которые могут воздействовать на организм без последствий лишь ограниченное время; непереносимые нагрузки – которые могут привести организм к заболеваниям, травмам либо к гибели.

4.4.3. Реакции организма на периодическую нагрузку

Нагрузки, воздействующие на живые организмы, достаточно часто носят не только одиночный, случайный, но и периодический характер. Как уже было указано выше, наиболее часто периодический характер нагрузок связан с вращением Земли. Кроме того, у человека он может быть связан с производственными процессами, режимом труда и отдыха и другими причинами. Реакция организма на периодическую нагрузку зависит от разных причин: что собой представляет эта нагрузка, ее величина, параметры периодичности и другого. Рассмотрим в качестве примера воздействие на организм человека нормальной периодической физической нагрузки прямоугольной формы.

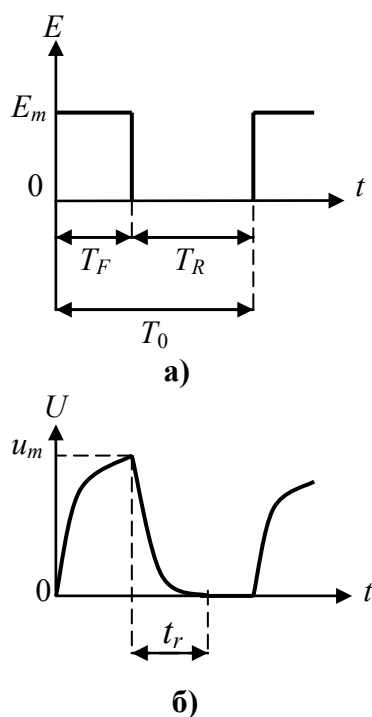


Рис. 4.11. График колебаний функционального сдвига u от воздействия нормальной периодической нагрузки E .

На рис. 4.11 приведены: график периодического чередования нагрузок E (а) и график соответствующих функциональных сдвигов u (б).

Как видно из графика а) на рис. 4.11, на организм человека периодически, с периодом t_0 , длительностью t_F и паузой t_R воздействует нагрузка величиной E_m .

Как видно из графика б) на рис. 4.11, в течение времени воздействия t_F нагрузки E_m в организме человека происходит реакция, выражающаяся в виде роста функционального сдвига u , достигающего к концу времени воздействия значения u_m .

Во время пауз между нагрузками длительностью t_R происходит восстановление функционального сдвига E , который фактически достигает своего исходного значения 0 за время t_r .

Точное время восстановления функционального сдвига здесь также определить невозможно в связи с экспоненциальной зависимостью приближения его значения к оси абсцисс.

Как видно из графиков а) и б), $t_r < t_R$, а закономерности роста функциональных сдвигов u при последующих нагрузках E_m идентичны. Это означает, что к началу следующей нагрузки организм полностью восстановился от действия предыдущей нагрузки.

Рассмотрим случай воздействие на организм периодической повышенной нагрузки E_m , при которой $t_r > t_R$.

На рис. 4.12 представлен график воздействия на организм периодической повышенной нагрузки.

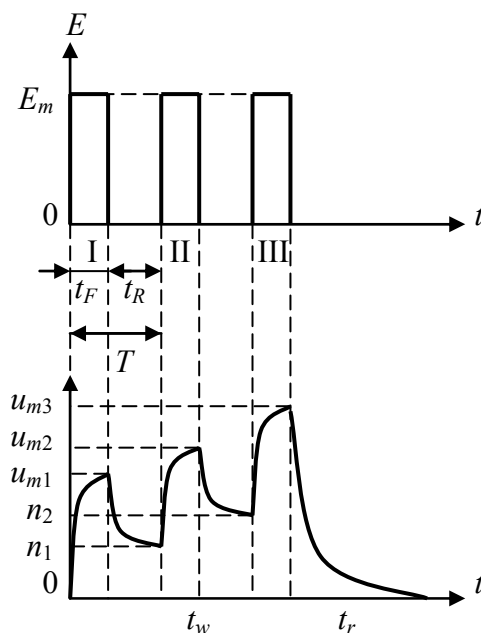


Рис. 4.12. График колебаний функционального сдвига u при воздействии повышенной периодической нагрузки E

Как видно из графика на рис. 4.12, воздействие на организм повышенной нагрузки I величиной E_m и длительностью t_F вызывает повышенный функциональный сдвиг u_{m1} . Этот сдвиг не успевает полностью восстановиться за время паузы t_R , и к моменту прихода нагрузки II остаточное значение функционального сдвига составляет n_1 .

В результате действия нагрузки II функциональный сдвиг u растет и достигает значения $u_{m2} > u_{m1}$, который также не успевает полностью восстановиться до прихода нагрузки III и его остаточное значение уже составляет $n_2 > n_1$. Воздействие нагрузки III вызывает рост функционального сдвига u до значения u_{m3} . И только в процессе длительной паузы t_r функциональный сдвиг u восстанавливается полностью.

Такой рост функциональных сдвигов часто происходит в течение рабочей недели при полном восстановлении за выходные дни, при вахтовых графиках работы в экстремальных условиях (неделя через неделю) и в других случаях.

4.5. Основные закономерности фенотипической адаптации

4.5.1. Оперативная фенотипическая адаптация

Как было показано в разделе 4.1, оперативная фенотипическая адаптация представляет собой реакции организма на все кратковременные факторы, влияющие на его жизнедеятельность, не меняя при этом средние значения показателей его функциональных систем. Свойства оперативной фенотипической адаптации многоклеточных живых организмов определяются результатом совокупных свойств клеток, органов и систем, из которых они состоят, а также всего организма реагировать на те или иные нагрузки изменением происходящих в них различных видов биохимических

процессов для сохранения устойчивости неравновесного термодинамического состояния.

Закономерности реакций живых организмов на нагрузки при оперативной фенотипической адаптации фактически уже рассмотрены в разделах 4.4.2 «Реакция организма на одиночную нагрузку» и 4.4.3 «Реакция организма на периодическую нагрузку».

4.5.2. Устойчивая фенотипическая адаптация

4.5.2.1. Устойчивая фенотипическая адаптация при воздействии постоянной одиночной нагрузки

При рассмотрении процессов оперативной фенотипической адаптации было установлено, что при воздействии на организм каких-либо нагрузок в нем происходят соответствующие этим нагрузкам изменения в виде циклов биохимических реакций. Если такая нагрузка по своей величине соответствует нормальной или повышенной, возникает сравнительно редко и на короткое время, то каждый раз после ее окончания режим работы клетки восстанавливается до исходного уровня, так как для этого требуется незначительное время.

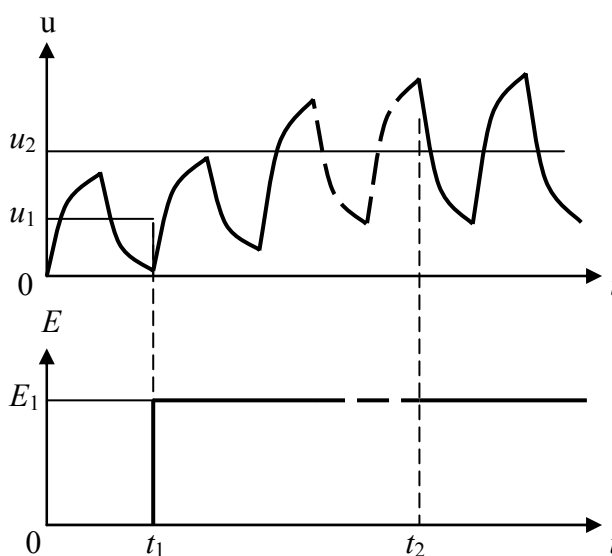


Рис. 4.13. Процесс устойчивой фенотипической адаптации

Если же такая нагрузка действует длительное время, а перерывы между нагрузками сравнительно короткие, то в результате многочисленных циклов метаболизма в клетке постепенно возникают определенные физические изменения. Режим функционирования клетки перестроится на повышенное или пониженное количество питательных веществ, а биохимические реакции на повышенное или пониженное количество реактивов.

Таким образом, режим функционирования клетки в условиях постоянного действия нагрузки станет для нее нормальным, и он будет сохраняться все время ее действия.

График такого процесса изображен на рис. 4.13.

Как видно из рис. 4.13, до начала действия нагрузки E_1 , в период времени $0 - t_1$, среднее значение колебаний функционального сдвига составляло u_1 .

В результате фенотипической адаптации за длительный период времени $t_2 - t_1$ действия нагрузки E_1 происходят изменения в ходе биохимических реакций, в результате которых среднее значение колебаний функциональных сдвигов u_1 увеличивается до значения u_2 , которое становится постоянным в условиях постоянного воздействия нагрузки E_1 .

При длительном снятии нагрузки произойдет фенотипическая адаптация в обратном направлении до исходного уровня, так как ее величина ниже предельно допустимой.

Необходимо отметить, что в реальных условиях в большинстве случаев нагрузка не прикладывается мгновенно, а нарастает в течение определенного времени.

Кроме того, живые организмы реагируют не только на величину нагрузки, но и на скорость ее нарастания (поэтому спортсмены, чтобы уменьшить величину воздействия нагрузки, прежде чем выполнять соответствующие упражнения, предварительно «разогреваются»).

На рис. 4.14 показан пример графика реальных изменений колебаний функциональных сдвигов u при действии постоянной нагрузки E_1 .

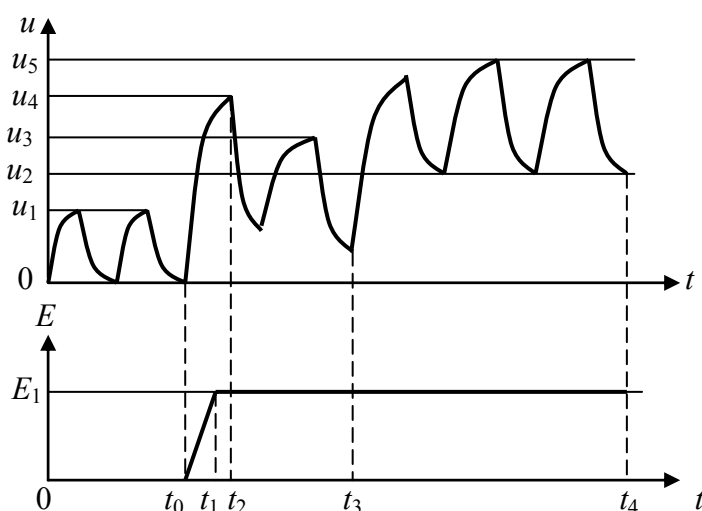


Рис. 4.14. График изменений колебаний функциональных сдвигов u при быстром воздействии постоянной нагрузки E_1 .

Как видно из графика на рис. 4.14, до начала действия нагрузки E_1 колебания функционального сдвига находятся в пределах $(0 - u_1)$.

Нагрузка E_1 на организм начинает действовать с момента t_0 , возрастая за промежуток времени $t_0 - t_1$ от значения 0 до значения E_1 .

За промежуток времени $t_0 - t_2$ действия нагрузки E_1 верхний предел колебаний функционального сдвига u резко вырастает от значения u_1 до u_4 .

Это объясняется реакцией организма на два одновременно воздействующих параметра нагрузки: величину E_1 и скорость ее нарастания:

$$v = \frac{dE_1}{dt} \quad (4.9)$$

В течение промежутка времени $t_2 - t_3$ функциональный сдвиг u незначительно восстанавливается, достигая верхним пределом уровня u_3 , так как происходит восстановление функционального сдвига, вызванного действием параметра скорости нарастания нагрузки.

Далее происходят изменения колебаний функционального сдвига u , определяемые только действием величины нагрузки E_1 : размах колебаний функционального сдвига уменьшается при одновременном увеличении среднего уровня его значения.

С момента времени t_4 процесс перестройки организма можно считать установившимся.

При этом колебания функционального сдвига будут постоянно, в течение всего времени действия нагрузки E_1 , находиться в пределах $u_2 - u_5$.

После снятия нагрузки в течение определенного времени может произойти возврат функционального сдвига u к значениям, близким, но не равным исходным, так как в процессе жизнедеятельности живых организмов непрерывно происходят необратимые процессы.

4.5.2.2. Устойчивая фенотипическая адаптация при воздействии длительной периодической нагрузки

При приведенном выше анализе реакций организма на периодическую нагрузку были рассмотрены основные закономерности реакций живых организмов на воздействия нагрузок прямоугольной формы. Теперь же определим закономерность процесса адаптации живых организмов при таких нагрузках на примере организма человека в случае их длительного воздействия. Характер процесса фенотипической адаптации в основном зависит от таких параметров нагрузки, как абсолютная величина, периодичность и длительность воздействия.

Если абсолютная величина нагрузки относится к категории нормальных и соотношение длительностей воздействия нагрузки и пауз такие, при которых функциональный сдвиг, вызванный нагрузкой, полностью восстанавливается, то при этом фенотипической адаптации не происходит, так как организм уже адаптирован к таким нагрузкам. Если абсолютная величина нагрузки относится к категории повышенных, и при этом время восстановления функциональных сдвигов, вызванных нагрузкой, фактически будет больше времени пауз между нагрузками, то начнется процесс длительной фенотипической адаптации. При этом в организме будут происходить биохимические реакции как синтеза из продуктов питания, так и расщепления АТФ в объемах, незначительно превышающих обычные, величина которых будет обеспечивать устойчивость его неравновесного термодинамического состояния.

Процесс устойчивой фенотипической адаптации, при котором воздействующая на организм нагрузка носит периодический характер, вызывая при этом соответствующие периодические последовательности реакций синтеза из продуктов питания и расщепления АТФ, обеспечивает возможность значительно больших диапазонов перестроек функциональных параметров организма, чем при постоянной нагрузке.

Это вызвано с тем, что периодический характер нагрузок позволяет организму обеспечить более оперативно процессы изменений скоростей биохимических реакций и объемов реактивов, участвующих в них.

Закономерность этих процессов имеет индивидуальный характер, так как она непосредственно связана как с собственными биологическими ритмами, так и с физиологическим состоянием живых организмов.

Указанное свойство организма достаточно убедительно подтверждается процессами тренировок спортсменов, когда при правильном выборе графиков последовательных изменений в сочетаниях нагрузок и отдыха достигаются значительные показатели в спортивных достижениях.

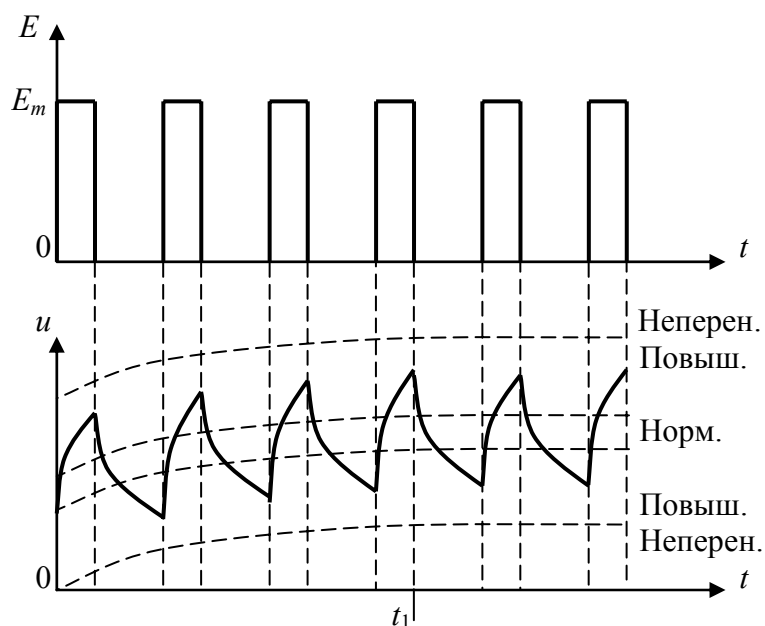


Рис. 4.15. Примерный график устойчивой фенотипической адаптации к периодическим нагрузкам с постоянными параметрами

На рис. 4.15 представлен примерный график процесса устойчивой фенотипической адаптации при воздействии на организм периодической нагрузки.

Как видно из графика на рис. 4.15, в начальный период времени $0 - t_1$ воздействия нагрузки E_m происходит перестройка функциональных сдвигов u , при которых восстановление за время пауз между нагрузками полностью не происходит.

Однако с момента времени t_1 рост и восстановление функциональных сдвигов стабилизируется.

Это означает, что фенотипическая адаптация закончилась и процессы синтеза из продуктов питания и расщепления АТФ начинают происходить уже на другом уровне.

При этом одновременно происходит и сдвиг значений нагрузок, характеризующих нормальную, повышенную и непереносимую нагрузки.

Таким образом, свойство фенотипической адаптации живых организмов к изменяющимся условиям внешней среды обусловлено принципом функционирования биохимических реакций в виде чередующихся последовательностей циклов синтеза и расщепления веществ.

Указанный принцип позволяет оперативно и в большом диапазоне «раскачивать» в необходимых пределах объемы всего комплекса веществ, участвующих во взаимосвязанном между собой множестве биохимических реакций при одних условиях внешней среды, и замедлять их при других условиях.

Тем самым обеспечивается высокая устойчивость неравновесного термодинамического состояния живых организмов при самых разных условиях их существования.

4.6. Фенотипическая адаптация и окружающая среда

4.6.1. Основные закономерности изменений параметров окружающей среды

При рассмотрении вопросов неравновесной термодинамики было установлено, что одним из основных термодинамических свойств неживой материи является то, что неживая материя всегда находится в неустойчивом неравновесном термодинамическом состоянии

В отличие от неживой природы, что так же указывалось выше, живые организмы для обеспечения своей жизнедеятельности всегда должны находиться в устойчивом неравновесном термодинамическом состоянии.

Поэтому любые изменения параметров внешней среды немедленно вызывают в живых организмах посредством обратных связей соответствующие изменения в протекании биологических процессов, направленных на сохранение устойчивого неравновесного термодинамического состояния.

При этом если изменения параметров внешней среды периодические, то они вызывают в живых организмах соответствующие периодические изменения в протекании биологических процессов.

В свою очередь случайные изменения параметров внешней среды вызывают соответствующие случайные изменения в протекании этих процессов.

Значения параметров внешней среды, их состав и закономерность изменений на территории обитания живых организмов в основном определяются ее географической зоной и в большинстве случаев подчиняются соответствующим законам статистики.

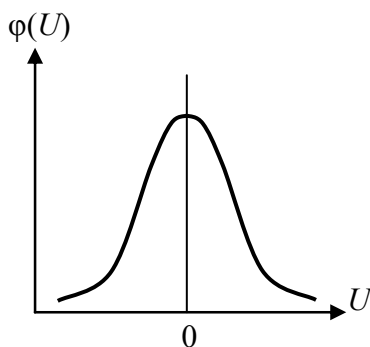


Рис. 4.16. График плотности нормального распределения вероятности

В общем случае каждый из параметров внешней среды: температура воздуха, влажность и другие, а также их совокупности имеют соответствующие статистические характеристики вероятности, закономерности которых обычно соответствует закону плотности нормального распределения вероятности (рисунок 4.16), выражаемому формулой (4.10):

$$\varphi(U) = \frac{1}{\sqrt{2p}} e^{-\left(\frac{U^2}{2}\right)}, \quad (4.10)$$

где: $\varphi(U)$ – значение вероятности; U – плотность нормального распределения вероятности.

Популяции живых организмов, постоянно проживающие в условиях определенной окружающей среды и прошедшие процесс генотипической адаптации – естественного отбора, в своем подавляющем большинстве обычно хорошо приспособлены к параметрам окружающей среды обитания. Причем степень приспособленности индивидов, входящих в популяцию, так же обычно соответствует закону плотности нормального распределения вероятности.

Однако в природе всегда имеет место определенная вероятность того, что параметры внешней среды могут измениться настолько много, что для большинства особей той или иной популяции станут дискомфортными, при которых их существование значительно усложнится, а также и непереносимыми.

В результате для популяции сложатся условия, несовместимые с возможностью выживания, и тогда популяция вымирает.

Для характеристики внешней среды по условиям жизнедеятельности разделим ее на три зоны: комфорта, дискомфорта и непереносимости со следующими определениями:

Зона комфорта - диапазон совокупных условий внешней среды, в котором жизнедеятельность данного вида живых организмов происходит наиболее комфортно, а воздействующие на них нагрузки относятся к категории нормальных.

Зона дискомфорта – диапазон совокупных условий внешней среды, в которых живые организмы данного вида находятся в трудных условиях

выживания, а воздействующие на них нагрузки относятся к категории повышенных.

Зона непереносимости – диапазон совокупных условий внешней среды, при которых жизнедеятельность данного вида живых организмов невозможна, и воздействующие на них нагрузки относятся к категории непереносимых.

4.6.2. Внешняя среда и жизнедеятельность живых организмов

Для каждого вида, для каждой популяции живых организмов всегда имеется свой, предпочтительный набор условий, наиболее оптимально подходящих для их жизнедеятельности. Например, для одних видов предпочтителен более влажный и теплый климат, для других более сухой и холодный, для третьих необходимы солнечные лучи и т.д. Причем в каждом виде и в каждой популяции имеется определенный разброс, определенная дисперсия требований к параметрам окружающей среды, связанная с индивидуальными особенностями особей.

Здесь необходимо отметить, что указанный предпочтительный набор условий не является чем-то незыблемым, он так же достаточно динамичен, меняясь вслед за процессами генотипическими и фенотипическими адаптациями популяций.

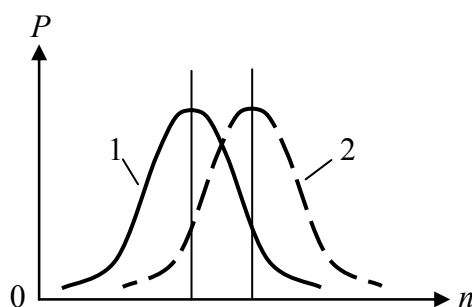


Рис. 4.17. График распределения плотности вероятности обобщенных показателей внешней среды

На рис. 4.17 изображен пример графика распределения плотности вероятности обобщенных показателей реальной (кривая 1) и оптимальной (кривая 2) внешней среды для некоторого вида живых организмов.

Как видно из рис. 4.17, реальная закономерность распределения плотности вероятности параметров внешней среды в значительной степени, но не полностью совпадает с оптимальной для исследуемого вида.

Это означает, что исследуемый вид не до конца адаптирован к параметрам внешней среды.

Поскольку эти графики достаточно близки, то можно ожидать, что со временем, путем как генотипической, так и фенотипической адаптаций, этот вид в еще большей степени приспособится к данной внешней среде.

В случаях, когда такие графики в значительной степени не совпадают, например при экологических катастрофах, это ведет к гибели вида.

Однако, кроме состояния окружающей среды, для живых организмов имеет исключительно большое значение то, каким образом осуществляется их жизнедеятельность.

Для этого уточним содержание широко используемых в современной науке понятий: «условия жизнедеятельности», «оптимальные условия жизнедеятельности» и «оптимальная жизнедеятельность»:

Условия жизнедеятельности - совокупность физических, химических, биологических и психологических факторов внешней среды, оказывающих то или иное влияние на процессы жизнедеятельности живых организмов.

Оптимальные условия жизнедеятельности – совокупность физических, химических, биологических и других факторов внешней среды, при которых может быть обеспечена максимальная устойчивость неравновесного термодинамического состояния живых организмов.

Оптимальная жизнедеятельность – совокупность биологических, физических и иных функций, при которых в заданных условиях внешней среды обеспечивается максимальная устойчивость неравновесного термодинамического состояния живых организмов.

На рис. 4.18 представлен идеализированный пример графика суточных колебаний функциональных сдвигов организма человека в случае его оптимальной жизнедеятельности.

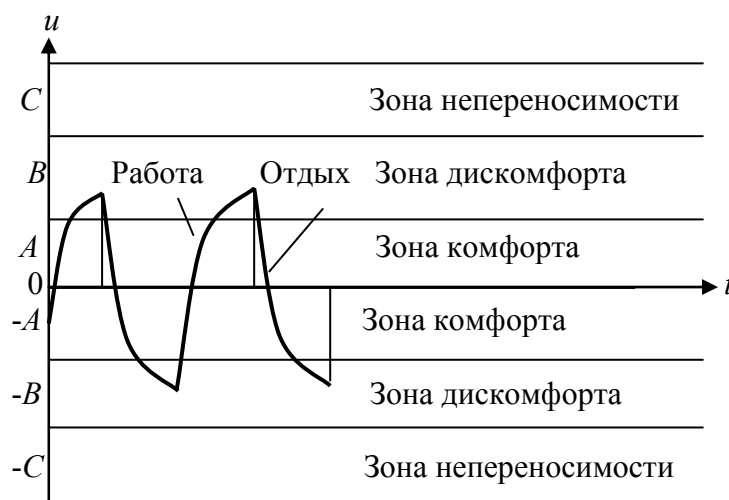


Рис. 4.18. Идеализированный график суточных колебаний функциональных сдвигов человека при оптимальной жизнедеятельности

Как видно из графика на рис. 4.18, для обеспечения максимальной устойчивости неравновесного термодинамического состояния организма человека размах колебаний функциональных сдвигов должен быть также максимальным и находиться не только в пределах зоны комфорта, но также и в нижней (например, при гиподинамии) и в верхней (например, при гипердинамии) зонах дискомфорта.

При этом значения зон комфорта, дискомфорта и непереносимости в результате процессов фенотипической адаптации будут в определенных

пределах расширяться, обеспечивая тем самым максимальную устойчивость неравновесного термодинамического состояния организма.

Если все суточные колебания, представленные на графике, идентичны или достаточно близки друг другу, то это означает, что организм в течение суток полностью восстанавливается от испытываемых перегрузок.

Режим, при котором колебания функциональных сдвигов имеют максимальный размах, входящий в зону дискомфорта, и при этом в течение суток полностью восстанавливаются, является наиболее близким к оптимальному. При этом организм готов к максимальным для него значениям перегрузок.

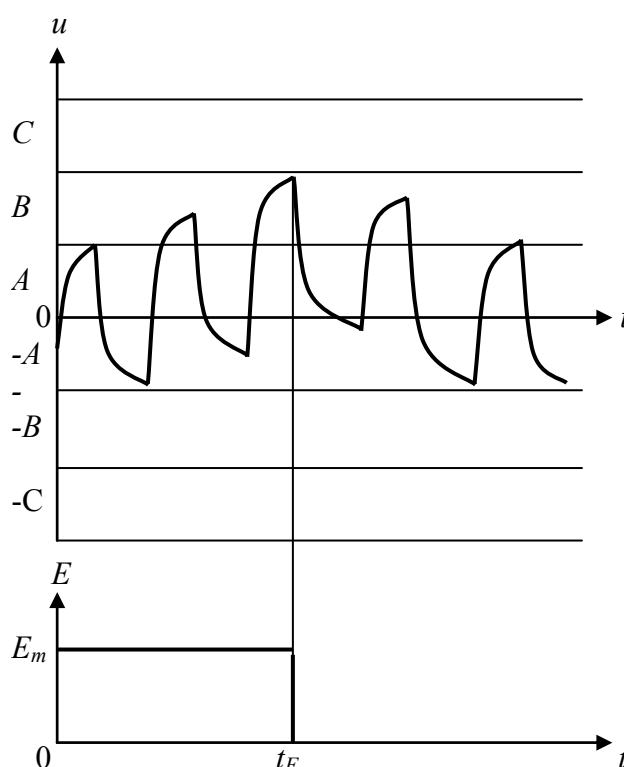


Рис. 4.19. График изменений периодических колебаний функциональных сдвигов u от нагрузки E_m

C , $-C$ – зоны непереносимости, B , $-B$ – зоны дискомфорта, A , $-A$ – зоны комфорта.

В случае возникновения перегрузок периодические колебания функциональных сдвигов организма будут иметь вид, представленный на рисунке 4.19.

Как видно из рисунка 4.19, при изменениях параметров окружающей среды в течение времени от 0 до t_F , вызывающих повышенную нагрузку на организм E_m , соответствующим образом меняется процесс колебаний функциональных сдвигов u , сдвигаясь вверх к зоне непереносимости.

При восстановлении исходного значения окружающей среды – в момент t_F постепенно полностью восстанавливаются и параметры колебаний функциональных сдвигов. Необходимо отметить, что зоны комфорта, дискомфорта и непереносимости, так же как и нормальные, повышенные и

непереносимые нагрузки являются индивидуальными параметрами для каждого организма.

Глава 5. Гигиенические и эргономические показатели системы «человек-машина»

5.1. Содержание гигиенических и эргономических показателей

Технология производства продукции, определяющая как режим работы машин, так и режим работы человека, должна обеспечивать не только безопасные, но и оптимальные условия и характер труда.

В связи с этим определим содержание понятий «гигиенические показатели» и «эргономические показатели» в соответствии с их фактической ролью в оценке условий труда следующим образом:

Степень безопасности условий и характера труда определяется гигиеническими показателями рабочего места, представляющими собой соответствующие технические показатели машин, оборудования и экологической обстановки, а также его тяжестью и напряженностью.

Степень оптимальности условий и характера труда определяется эргономическими показателями, представляющими собой соответствующие физиологические показатели организма людей при воздействии на них указанных выше гигиенических показателей рабочего места.

5.2. Способы количественной оценки воздействия на организм человека различных нагрузок

Количественная оценка воздействия на живые организмы параметров внешней среды является одной из наиболее серьезных научных проблем.

Основная трудность заключается в том, что живые организмы и внешняя среда характеризуются множеством различных параметров, имеющих различную природу и различные единицы измерения.

К настоящему времени известны пять основных способов оценки воздействия на живые организмы параметров внешней среды:

- бальная оценка;
- оценка по степени риска;
- оценка по флуктуирующей асимметрии;
- оценка по анкетам;
- оценка по способу Доброборского- Кадыскиной.

Наиболее распространенными из них являются бальные оценки при определении тяжести и напряженности труда, а также оценка с помощью анкетных опросов, используемая при различных психологических исследованиях.

Рассмотрим указанные системы оценок более подробно.

5.2.1. Бальная оценка

Бальная оценка представляет собой перечень всевозможных видов нагрузок, воздействующих на организм. Каждый из них имеет определенный вес, выраженный в баллах. В зависимости от количества набранных баллов тот или иной вид трудовой деятельности или характеристика внешней среды оценивается в соответствующих категориях.

В табл. 5.1 представлен пример классификации условий труда с помощью системы баллов, используемой в «Руководстве по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда. (Руководство Р.2.2.2006-5)».

Таблица 5.1.

Классы условий труда по показателю температуры воздуха (°С, нижняя граница) для открытых территорий в холодный период года и в холодных (не отапливаемых) помещениях

Климатическая зона	Тепло-изоляция одежды, °С, Вт/м	К л а с с ы у с л о в и й т р у д а					
		Допустимый	В р е д н ы й - 3				Опасный (экстремальный)
			1	2	3	4	
			степень	степень	степень	степень	
	°С, Вт/м	2	3.1	3.2	3.3	3.4	4
І А	0,71	-30	-36	-38,5	-40,8	-60	< - 60,0
І Б	0,82	-38	-46,2	-48,9	-54,4	-70	< - 70,0
ІІ	0,61	-23	-29,4	-31,5	-35,7	-48	< - 48,0
ІІІ	0,51	-15,9	-21,3	-23	-26	-37	< - 37,0

Как видно из табл. 5.1, в данном документе условия труда по степени вредности делятся на условные классы, не учитывающие характер труда по тяжести и напряженности, наличия освещенности, вибрации, шума, пыли и так далее. Очевидно, что основные недостатки способа оценки с помощью баллов заключаются в том, что он метрологически необоснован, не отражает все возможные сочетания параметров окружающей среды, часто являющиеся потенцирующими и поэтому обеспечивает весьма приближенную оценку реальной ситуации.

5.2.2. Оценка по степени риска

Оценка по степени риска представляет собой три вида процедур:

а) идентификацию опасности, оценку воздействия, оценку зависимости "доза - ответ" и характеристику риска;

б) научную оценку источников (токсических свойств химического вещества или свойств физических факторов) и условий их воздействия на человека, направленную на установление вероятности того, что экспонированные люди окажутся пораженными, а также на характеристику природы тех эффектов, которые у них могут возникнуть;

в) оценку вида и степени выраженности опасности, создаваемой источником в результате существующего или возможного воздействия на определенную группу людей, а также существующий или потенциальный риск для здоровья, связанный с данным источником.

Способ оценки по степени риска в большинстве случаев обеспечивает возможность прогнозирования влияния внешней среды на основании статистических данных.

Однако этот способ не выявляет основные источники, определяющие степень риска в случаях комбинированного действия многих источников, а так же не дает конкретную количественную биологическую (физиологическую) оценку величины поражения людей.

5.2.3. Оценка методом биоиндикации

Биоиндикация - способ ориентировочной оценки антропогенной нагрузки по реакции на нее разнообразных живых организмов и их сообществ, например угнетения или развития фитопланктона в водной среде.

Из всего многообразия известных методов биоиндикационных исследований считается, что наиболее полно отвечает необходимым критериям метод анализа флуктуирующей асимметрии. Флуктуирующая асимметрия является следствием несовершенства онтогенетических процессов, неспособности организмов развиваться по точно определенным путям.

По феноменологии она представляет собой небольшие ненаправленные отклонения живых организмов от строгой билатеральной симметрии.

При этом различия между сторонами не являются строго генетически детерминированными и, следовательно, зависят, в основном, от внешних условий. Оценка флуктуирующей асимметрии производится в баллах.

Таблица 5.2.

Степень отклонения среды от нормы по нарушению стабильности развития наиболее массовых (фоновых) видов

Стабильность развития в баллах	Качество среды
1-ый балл	- Условно нормальное
2-ой балл	- Начальные (незначительные) отклонения от нормы
3-ий балл	- Средний уровень отклонений от нормы
4-ый балл	- Существенные (значительные) отклонения от нормы
5-ый балл	- Критическое состояние

В табл. 5.2 приведен пример такой оценки для определения стабильности развития живых организмов по уровню асимметрии морфологических структур.

Методика основана на выявлении, учете и сравнительном анализе асимметрии у разных видов живых организмов по определенным признакам.

Определение величины флуктуирующей асимметрии билатеральных морфологических структур при использовании меристического (счетного) признака у каждой особи производится путем просчета числа определенных структур слева и справа в указанных границах.

Популяционная оценка выражается средней арифметической различия в количестве структур слева и справа. При использовании пластического (мерного) признака у каждой особи измеряют определенные структуры слева и справа. Величина асимметрии вычисляется путем деления разницы в промерах на двух сторонах на их сумму.

Приведем в качестве примера методику оценки стабильности развития березы повислой (*Betula pendula*).

На рис. 5.1 представлена схема морфологических признаков, использованных для этой оценки.



Рис. 5.1. Схема морфологических признаков, использованных для оценки стабильности развития березы повислой (*Betula pendula*)

1- ширина левой и правой половинок листа. 2 - длина жилки второго порядка, второй от основания листа. 3 - расстояние между основаниями первой и второй жилок второго порядка. 4 - расстояние между концами этих же жилок. 5 - угол между главной жилкой и второй от основания листа жилкой второго порядка.

Методика измерений заключается в следующем.

Для измерения лист складывают пополам, совмещая верхушку с основанием листовой пластинки.

Потом разгибают лист и по образовавшейся складке измеряют расстояние от границы центральной жилки до края листа.

Для оценки степени выявленных отклонений от нормы, их места в общем диапазоне возможных изменений показателя используют пятибалльную шкалу. Основным недостатком метода является невозможность определить причины флуктуирующей асимметрии и весьма условная ее количественная оценка.

5.2.4. Оценка по анкетным опросам

Оценка по анкетным опросам — один из видов опросных методов, применяемый для получения эмпирической информации, касающейся

объективных фактов, знаний, мнений, оценок и поведения. Этот метод широко используется в социологии, психологии, педагогике, других областях науки и практики, например, в профилактической медицине для широкомасштабного выявления лиц с риском заболевания ишемической болезнью сердца.

Существенной особенностью метода является опосредованный характер взаимодействия между исследователем и исследуемым (респондентом), которые общаются при помощи анкеты, причем респондент сам читает предлагаемые ему вопросы и сам фиксирует свои ответы.

5.2.5. Оценка по способу Доброборского-Кадыскиной

В результате дальнейших исследований, направленных на разработку способов объективной количественной оценки условий труда, в 1996 году был предложен способ Доброборского-Кадыскиной, в значительной степени решающий эту проблему. Этот способ до настоящего времени не введен в официальные нормативные документы, однако успешно используется при решении задач оптимизации условий труда и рабочих мест.

Предложенный способ основан на хорошо известном физиологам и биологам и упоминавшемся ранее факте зависимости времени восстановления функциональных сдвигов от их величины. Отсюда следует, что мерой воздействия на организм человека различных нагрузок, в частности в процессе различных видов труда, как физического, так и умственного, может быть использован критерий времени восстановления функциональных сдвигов, вызванных этими нагрузками, после их снятия. Причем критерий времени восстановления функциональных сдвигов не зависит от того, какими причинами эти функциональные сдвиги были вызваны. В результате был предложен новый показатель ЭРГОЕМКОСТЬ со следующим определением:

ЭРГОЕМКОСТЬ - показатель, характеризующий временные затраты организма людей на восстановление функциональных сдвигов, вызванных их работой с инструментами, машинами или другими источниками нагрузки в соответствующих условиях, после прекращения работы.

Однако для количественной оценки труда так же необходимо определение значения эргоемкости в зависимости от времени труда.

Поэтому так же был предложен показатель УДЕЛЬНАЯ ЭРГОЕМКОСТЬ со следующим определением:

УДЕЛЬНАЯ ЭРГОЕМКОСТЬ - показатель, характеризующий отношение времени восстановления функциональных сдвигов при отдыхе ко времени их возникновения в процессе работы.

Измерение удельной эргоемкости производится в D :

$$D = \frac{T_{\text{увв}}}{T_{\text{р}}}, \quad (5.1)$$

где $T_{\text{увв}}$ – условное время восстановления функциональных сдвигов,
 $T_{\text{р}}$ – время работы.

Как будет показано ниже, условное время восстановления функциональных сдвигов введено в связи с принципиальной невозможностью обеспечения прямых измерений. Таким образом, для объективной количественной оценки интегрального воздействия различных факторов рабочего места на организм человека необходимо определить основные функциональные сдвиги, вызываемые воздействием этих факторов, измерить время воздействия этих факторов и время их восстановления.

5.3. Методика определения основных функциональных сдвигов

В зависимости от состава нагрузок, воздействующих на организм человека, в нем возникают самые разные функциональные сдвиги, как по составу, так и по величине. Например, при длительной работе за компьютером возникают функциональные сдвиги, связанные с малоподвижностью и интенсивной умственной деятельностью. В свою очередь при работах в шахтах функциональные сдвиги вызываются тяжелым физическим трудом, недостатком освещения, значительными уровнями шума и вибрации.

Для определения функциональных сдвигов, возникающих в организме человека в процессе труда, необходимо проведение комплексных физиологических исследований. А поскольку спектр возможных физиологических исследований может быть достаточно широк, для определения основных физиологических методов исследований необходимо предварительно произвести подробный анализ трудового процесса и выявить основной состав нагрузок, воздействующих на человека. Структура трудового процесса, как правило, определяется технологией производства продукции.

Технология производства продукции – это определенная последовательность выполнения производственных операций, осуществляемых человеком совместно с машиной, результатом которых является изготовление этой продукции, которая оформляется в виде конструкторско-технологических документов, называемых технологическими процессами, либо соответствующих инструкций.

Технологический процесс является наиболее совершенным и точным документов, регламентирующим выполнение соответствующих операций. Как правило, он представляет собой комплект операционных технологических карт, выполнение требований которых в заданной последовательности обеспечивает изготовление продукции. В каждой из таких карт приведен перечень аппаратуры, технологического оборудования и других изделий, которым должно быть оснащено каждое рабочее место для выполнения соответствующей операции, режимы их работы, время выполнения операции, а

так же детально описаны все элементы действий оператора, выполняющего соответствующую операцию. Каждый элемент выполнения операции называется переход.

В табл. 5.5 приведен пример операционной карты, представляющей собой технологический документ, в котором описаны конкретные действия оператора, работающего на конвейере. Работа представляет собой регулировку радиоэлектронной аппаратуры в относительно свободном режиме, жестко не зависящем от ритма конвейера. Оператор сидит на рабочем месте, расположенном у конвейера.

Таблица 5.5.

Операционная карта № 201 по регулировке блока №33

№ перехода	Выполняемое действие	Используемое оборудование	Время, с
1	2	3	4
	Перечень оборудования на рабочем месте	Стойка 1122, блок питания БП5, осциллограф С1-33, технологическая отвертка, штемпель №8, штемпельная подушка.	
1	Левой рукой снять блок с конвейера и установить в зажим стойки	Стойка 1122	3
2	Убедиться, что на блоке нет видимых механических повреждений		2
3	Правой рукой подключить разъем Х5 стойки к гнезду У5 блока	Стойка 1122	4
4	Установить тумблер блока питания в положение ВКЛ.	Блок питания БП5	2
5	Убедиться, что на блоке питания загорелась лампочка «С»	Блок питания БП5	1
6	Убедиться, что на блоке питания не горит лампочка «КЗ»	Блок питания БП5	1
7	Левой рукой подключить к разъему Х3 блока щуп осциллографа	Осциллограф С1-33	2
8	Убедиться, что на экране осциллографа присутствует синусоидальный сигнал	Осциллограф С1-33	2
9	Правой рукой вставить технологическую отвертку в шлиц потенциометра R3 блока	Технологическая отвертка	3
10	Вращением технологической отвертки установить на экране осциллографа размах синусоидального сигнала 4 клетки	Технологическая отвертка, осциллограф С1-33	5
11	Положить технологическую отвертку на рабочий стол	Технологическая отвертка	2
12	Левой рукой отключить от разъема Х3 блока щуп осциллографа	Осциллограф С1-33	2

13	Установить тумблер блока питания в положение «ВЫКЛ».	Блок питания БП5	1
14	Убедиться, что на блоке питания погасла лампочка «СЕТЬ»	Блок питания БП5	1
15	Правой рукой отключить разъем X5 стойки от гнезда Y5 блока	Стойка 1122	2
16	Поставить в правом углу блока штамп о выполненной операции	Штемпель №8, штемпельная подушка	2
17	Снять блок со стойки и положить его на конвейер		2

Как видно из табл. 5.5, в операционной карте достаточно детально описаны все действия оператора, что позволяет определить общий характер его труда и сделать предположения о составе и величине вызываемой этой работой функциональных сдвигов и определить необходимый перечень методик и состав аппаратуры для проведения физиологических исследований.

В частности, из приведенной операционной карты видно, что оператор выполняет достаточно легкие, несложные и разнообразные действия руками при относительно ненапряженном внимании, что свидетельствует о легком характере выполняемой работы.

Относительно свободный режим при достаточно высокой производительности труда позволяет ему в необходимых случаях произвести кратковременный отдых.

Однако при этом оператор в течение длительного времени должен находиться в вынужденной позе – положении сидя, при котором в ряде мышц и органов могут произойти изменения, связанные с гиподинамией – недостатком двигательной активности. Кроме того, время выполнения операции – 37 с, свидетельствует о значительной монотонности работы, так как за рабочую смену оператор должен выполнить более 750 операций.

В данном случае основными физиологическими исследованиями могут быть: измерение частоты сердечных сокращений, частоты дыхания, артериального давления, выполнение контрольных нагрузок на нижние конечности и поясничный отдел, измерение моторных реакций на свет и звук, измерение выносливости верхних и нижних конечностей и некоторые другие.

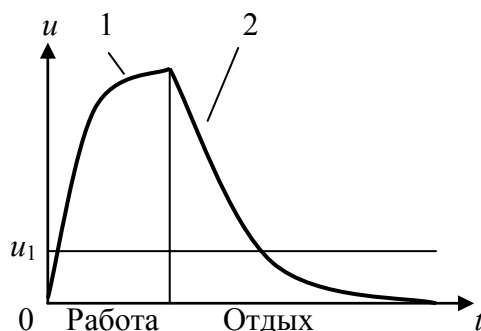


Рис. 5.2. Закономерность изменений функциональных сдвигов при нагрузке и отдыхе.

В зависимости от выбранных для физиологических исследований функциональных сдвигов подбирается комплект медицинской измерительной аппаратуры и определяется порядок исследований: время, периодичность, условия и так далее.

После этого производятся предварительные исследования, в ходе которых более точно устанавливаются функциональные сдвиги, подлежащие контролю, необходимая аппаратура, количество и состав операторов, ориентировочное количество исследований и прочие условия.

5.4. Методика определения времени восстановления функциональных сдвигов

Как было указано при анализе закономерностей изменений функциональных сдвигов, процесс их роста и восстановления в конечном итоге происходит в соответствии с законом действующих масс, как это видно из рис. 5.2.

Из рис. 5.2 так же видно, что точное измерение времени восстановления функционального сдвига в принципе невозможно, так как не существует точки пересечения кривой с осью абсцисс, а есть только ее монотонное приближение.

Кроме того, при приближении этой кривой к оси абсцисс резко возрастает влияние флуктуационных шумов, вызываемых различными причинами: внутренними шумами и чувствительностью измерительной аппаратуры, случайными внешними помехами и так далее. Поэтому вблизи оси абсцисс значительно уменьшается точность измерений.

Поскольку прямое измерение времени восстановления функциональных сдвигов оказалось невозможным, для решения этого вопроса была разработана специальная компьютерная программа «Loqus 2003.1».

Работа этой программы основана на математическом моделировании начальной части кривой восстановления функциональных сдвигов 2, поскольку она непрерывна и монотонно убывает, путем расчета времени достижения этой кривой значения $U_1 > 0$, как это показано на рис. 5.2.

При этом не определяется истинное время восстановления функциональных сдвигов, так как это невозможно по указанным выше причинам. Однако определяется условное время восстановления функциональных сдвигов, которое метрологически достоверно, так как графики восстановления всех анализируемых функциональных сдвигов, возникающих в организме, рассчитываются при одних и тех же условиях, и поэтому результаты расчетов времени их восстановления объективны и соизмеримы между собой.

Выбор значения U_1 определяется в зависимости от условий исследований, требований к точности измерений и учета других параметров, например возможности одновременного измерения нескольких показателей, необходимого времени для производства измерений. Точность измерений в основном зависит от количества измеренных точек в начальной (верхней) части кривой восстановления функциональных сдвигов, используемой аппаратуры и условий исследований.

Проведение измерений времени восстановления функциональных сдвигов с помощью программы «Loqus 2003.1» содержит несколько этапов. Первым из них является определение эргоемкости каждого из исследованных функциональных сдвигов. Пример таких результатов представлен на рис. 5.3, где изображен результирующий протокол исследований эргоемкостей воздействия нагрузки.

Loqus 2003.1 En - [Loqus 2003.1 En The protocol of tests]

File

Reg N°: 12134578 Surname: Петров Name: Виктор Sex: М Date of birth: 1978 The order N°: 127665423 Date of reg: 10.03.11

Physiological parameters

Before work

	Puls	ADD	ADS	Тем	Трем
1	60	120	80	36.6	12
2	75	120			11
3	71				10
4					
5					
Result	68,666	120	80	36,6	11

Ergoemcost

	1	2	3	4	5	6	7	8
	21	66	48	24	24		31	34

Distribution. %

Distrib: 8,4677 | 26,612 | 19,354 | 9,6774 | 9,6774 | 0 | 12,5 | 13,709

Specific Ergoemcost

Working time, mines: 480 Ers: 316,8

Physiological parameters

After work

Period, mines	5	15	10	20	15
Initial	140	140	95	36.9	15
6	110	138	94	36.9	14
7	100	136	92	36.8	14
8	90	136	91	36.8	14
9	80	135	91	36.7	13
10	78	135	90	36.7	12
11					
12					
13					
14					
15					

Atten **Stabil**

31 34

To enter

K1 K2 K3 K4 K5 K6 K7 K8

The additional information

Status: 12.03.2011 14:16

Рис. 5.3. Результирующий протокол исследований

Протокол содержит информацию об исследуемых любых физиологических параметрах (одновременно могут быть исследованы до 6 параметров), их значениях до эксперимента и после эксперимента, периодичности измерений каждого из параметров и их результатов, двух психологических параметров – «внимание» и «устойчивость», эргоемкости каждого из параметров, их процентное распределение, а так же удельную эргоемкость, зависящую как от измеренных значений эргоемкостей, так и от времени воздействия нагрузки.

Как видно из рис. 5.3, в процессе эксперимента производились исследования пульса, систолического наибольшей эргоемкости имеют функциональные сдвиги систолического (66) и диастолического (48) артериальных давлений, в меньшей степени тремор (дрожание кистей рук), а остальные еще меньше. Это предположительно означает, что организм человека в процессе труда испытывал основную нагрузку, вызывающую повышение артериального давления. Например, это мог бы быть труд, характеризующийся большим нервным напряжением.

Эргоемкость, вызванная психологическими нагрузками (на рисунке - Atten и Stabil.) определяется с помощью психологических тестов

«Внимание»(Attention) и «Устойчивость» (Stability) - электронные версии таблиц Шульте. Изображение теста «Внимание» представлено на рис. 5.4.

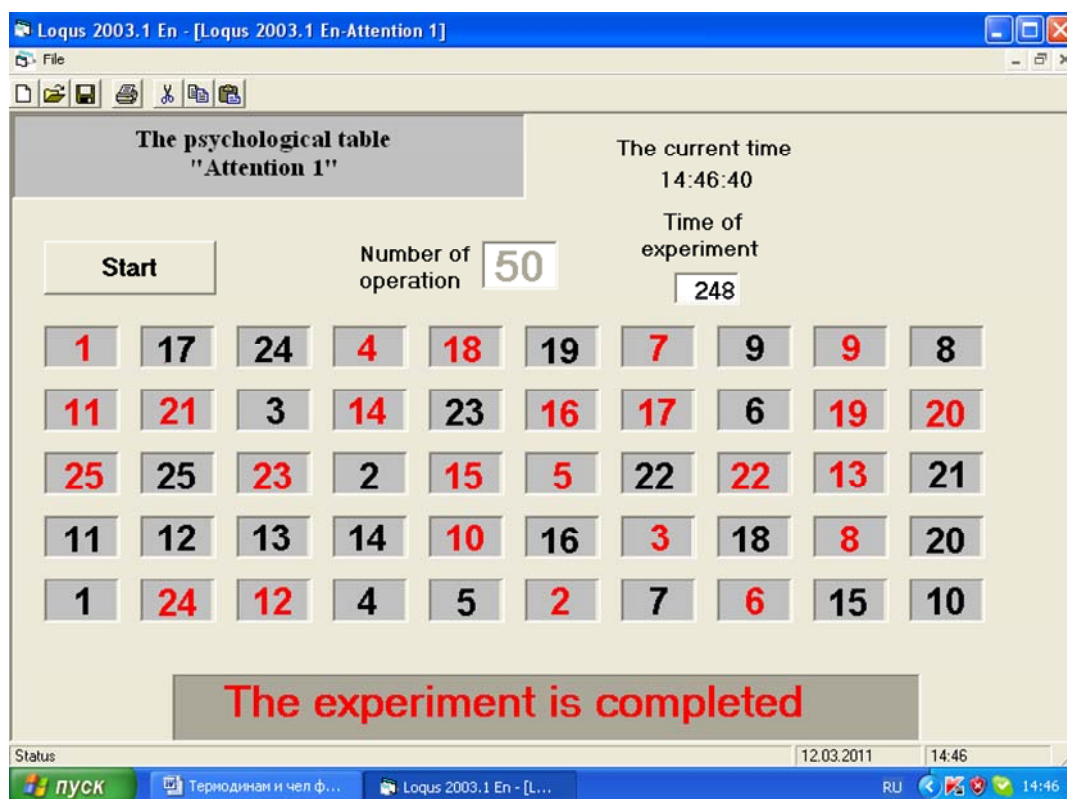


Рис. 5.4. Тест «Внимание»

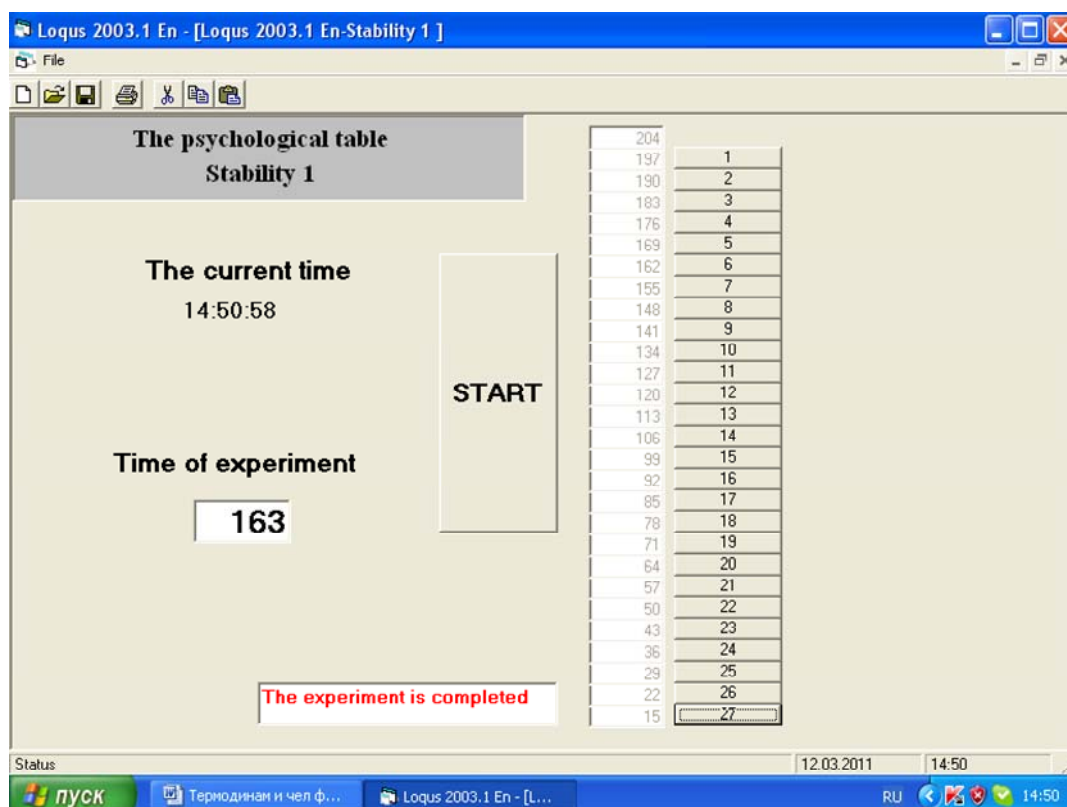


Рис. 5.5. Тест «Устойчивость»

Задачей испытуемого является максимально быстрое безошибочное поочередное нахождение цифр красного и черного цветов, причем красных в возрастающем порядке от 1 до 25, а черных - в убывающем от 25 до 1. Как видно из рис. 5.4, в данном примере на выполнение задания испытуемому понадобилось 248 секунд.

Изображение в программе «Loqus 2003.1» теста «Устойчивость» представлено на рис. 5.5.

Задачей испытуемого при выполнении теста «Устойчивость» является максимально быстрое безошибочное поочередное вычитание из каждого предыдущего числа число 7.

Результатом тестов является время выполнения задания, фиксируемое компьютерной программой.

В зависимости от условий выполнения заданий как по тесту «Внимание», так и по тесту «Устойчивость» возможна количественная оценка воздействия этих условий.

Например возможна оценка воздействия различных видов шумов как по уровню, так и по содержанию: непрерывный, импульсный, не-смысловой, смысловой и т.д.

Таким образом, применение способа Доброборского-Кадыскиной для оценки условий труда по времени восстановления функциональных сдвигов позволяет не только получить объективные количественные данные о биологических затратах человека в результате труда, но и определить наиболее перспективное направление работ по улучшению его условий и эффективности.

5.5. Неявные функциональные сдвиги

Наряду с функциональными сдвигами, которые значительно изменяются при действии нагрузок и которые сравнительно легко обнаружить и измерить, имеется достаточное количество функциональных сдвигов, проявляющихся на микроскопическом уровне, незаметных для человека и физиологов, но обладающих кумулятивным свойством – свойством накапливания.

К таким функциональным сдвигам относятся, например, незначительные, но постоянно получаемые повреждения нервных волокон и кровеносных сосудов верхних конечностей в результате воздействия вибрации, химическое и радиоактивное заражение организма, повреждения клеток в результате воздействия электромагнитных полей и многие другие.

В результате кумулятивного эффекта длительное, часто в течение многих лет, воздействие источников указанных нагрузок, к которым организм человека по определенным причинам не может адаптироваться, в ряде случаев приводит к тяжелейшим неизлечимым заболеваниям и даже летальным исходам.

К настоящему времени такие функциональные сдвиги не могут быть оперативно выявлены традиционными путями на ранней стадии из-за отсутствия соответствующих методов и аппаратуры.

Поэтому для решения этой проблемы, особенно в случаях заведомо вредных для здоровья специальностей, применяются периодические

медицинские профосмотры, диспансеризации, ежегодные снятия флюорограмм легких и другие мероприятия.

Указанный подход позволяет рано или поздно выявить эти функциональные сдвиги, но только когда они ко времени обследований достигнут необходимых для анализа значений, причем достаточно часто слишком поздно.

Таким образом, вопросы раннего выявления неявных функциональных сдвигов, до того, как они приводят к различного рода заболеваниям, а также их количественной оценки являются чрезвычайно актуальными.

Теоретический анализ возможности применения для раннего выявления такого рода функциональных сдвигов методов, основанных на теории термодинамики биологических систем показал, что в ряде случаев применение таких методов может быть эффективно.

Такие результаты могут быть в принципе получены путем комплексного статистического анализа закономерности изменений выбранной группы функциональных сдвигов по критериям времени их возникновения в результате воздействия определенных нагрузок, и времени их восстановления после снятия этих нагрузок.

При использовании указанного критерия такой анализ возможен благодаря тому, что при этих исследованиях все анализируемые функциональные сдвиги соизмеримы между собой. Однако, как показал обзор материалов исследований функциональных сдвигов, выполненных различными учеными, такая задача до сих пор не ставилась, поэтому данное предположение еще требует своего практического подтверждения.

Глава 6. Надежность работы систем «человек-машина». **Человеческий фактор**

6.1. Основные теоретические законы распределения отказов

Надежность работы системы «человек - машина» в общем виде может быть описана уравнением:

$$P(T \leq t) = \{P_N(T \leq t) + P_T(T \leq t)\}, \quad (6.1)$$

где P_N и P_T - вероятности отказов, обусловленные действиями человека и машины соответственно, T – время работы до первого отказа, t – время, в течение которого определяется вероятность отказов.

Закономерности зависимости вероятности отказов P_N и P_T при T меньшем или равном t у человека и машины определяется биологической природой организма человека с одной стороны и конструкцией, свойствами материалов и условиями эксплуатации машины с другой.

Для определения этих закономерностей рассмотрим основные теоретические законы распределения отказов.

Отказы в системах «человек - машина» возникают под воздействием разнообразных технических и человеческих факторов.

Поскольку каждый фактор в свою очередь зависит от многих, независимых друг от друга причин, то эти отказы относятся, как правило, к случайным событиям, а время работы системы «человек – машина» до возникновения отказов - к случайным величинам.

Однако возможны и не случайные (детерминированные) отказы (отказы, возникновение которых происходит в определенный момент времени, т.е. в момент возникновения причины благодаря однозначной и определенной связи между причиной отказа и моментом его возникновения). Например, если в цепи электрического устройства из-за человеческого фактора ошибочно поставлен предохранитель, не способный работать при пиковой нагрузке, то всякий раз, когда возникает эта нагрузка, он обязательно перейдет в отказовое состояние – разрыв цепи.

При анализе надежности систем «человек – машина» объектами исследования являются все возможные случайные события и величины, оказывающие соответствующее воздействие как на состояние человека, так и на машины.

В качестве теоретических распределений наработки до отказа могут быть использованы любые применяемые в теории вероятностей непрерывные распределения. Поэтому при определении надежности системы «человек – машина» необходимо произвести анализ закономерностей, которым подчиняется организм человека-оператора и исследуемая машина для выбора соответствующих распределений из применяемых в теории вероятностей.

Для этого рассмотрим понятия «случайное событие» и «случайная величина».

Случайное событие – это событие (факт или явление), которое в результате опыта может произойти или не произойти. Случайные события (отказы, восстановления, ремонт, травмы, лечение и др.) образуют случайные потоки и случайные процессы. Поток событий – последовательность событий, происходящих одно за другим в какие-то отрезки времени.

Например, отказы восстанавливаемого устройства или травмы человека образуют поток событий (поток отказов).

Под действием потока отказов и потока восстановлений машина или человек могут находиться в различных состояниях (полного отказа или работоспособности, частичного отказа или работоспособности, полной работоспособности).

Переход машины или организма человека из одного состояния в другое представляет собой случайный процесс.

Случайная величина - величина, которая в результате опыта может принимать то или иное значение, причем неизвестно заранее, какое именно.

Случайная величина может быть дискретной (число отказов за время t , число отказавших элементов при наработке заданного объема и т.д.), либо непрерывной (время наработки элемента до отказа, время восстановления работоспособности).

Закон распределения случайной величины – соотношение, устанавливающее связь между значениями случайной величины и их вероятностями.

Для характеристики этой случайной величины (непрерывной и дискретной) используется вероятность того, что случайная величина X меньше некоторой текущей переменной x .

Функция распределения случайной величины X (интегральный закон распределения) имеет вид:

$$F(x) = p(X < x). \quad (6.2)$$

Плотность распределения непрерывной случайной величины X (дифференциальный закон распределения) является производной от функции распределения:

$$f(x) = \frac{d}{dx} F(x). \quad (6.3)$$

Отсюда, в пределах изменений x от $-\infty$ до $+\infty$:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1, \quad (6.4)$$

то есть в пределах от $-\infty$ до $+\infty$ событие обязательно произойдет – вероятность наступления события равна 1.

Тогда, в пределах изменений x от $-\infty$ до X :

$$\int_{-\infty}^X f(x) dx = F(x) \quad (6.5)$$

В теории надежности за случайную величину обычно принимают время работы машины или человека до возникновения отказа.

Аналогичные рассуждения в принципе могут быть приведены и для человека, но, как будет показано ниже, в течение длительности одной рабочей смены.

6.2. Закономерность вероятности отказов машины

На рис. 6.1 представлен типовой пример графиков вероятностей отказов машины в результате износа.

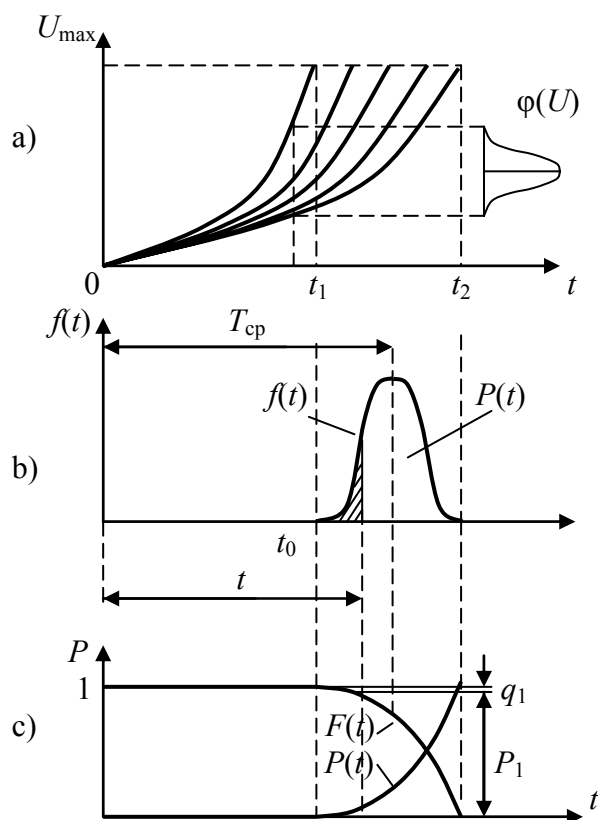


Рис. 6.1. Кривые распределения случайной величины при отказах в результате износов.
 а) – реализация функции износа $\varphi(U)$; б – плотность распределения сроков службы $f(t)$;
 с – интегральная функция распределения $F(t)$ и вероятность безотказной работы $P(t)$.

Как видно из рис. 6.1, функция плотности распределения сроков службы $f(t)$ служит полной характеристикой рассеивания сроков службы машины и условно человека, так как, благодаря своей биологической природе, организм человека обладает некоторыми иными свойствами, чем машина, в частности свойствами самовосстановления, например при отдыхе (рис. 5.2).

Кривая распределения $f(t)$ - частота отказов - дает возможность подсчитать средний срок службы машины T_{cp} (математическое ожидание $M[t]$), рассеивание (дисперсию D) этих сроков службы относительно центра группирования и другие числовые параметры случайной величины T .

Как видно из графика на рис. 6.1 а), в процессе эксплуатации машины отказы из-за износа в основном приходятся на период времени от t_1 до t_2 .

Причем наибольшая плотность отказов $\varphi(U)$ приходится на середину этого периода

За некоторый выбранный период времени работы машины t площадь $F(t)$ кривой распределения $f(t)$ будет характеризовать вероятность отказа (выхода из строя) машины за этот период времени (рис. 6.1, б). В связи с этим левая ветвь кривой распределения $f(t)$, относящаяся к области малой вероятности отказов, обычно используется для характеристики безотказности работы машины, а вся кривая $f(t)$ и ее параметры необходимы для оценки ее долговечности. Ординаты интегральной функции распределения $F(t)$ (рис. 6.1, с) характеризуют вероятность отказа машины до данного момента времени:

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt \quad (6.6)$$

Во многих случаях нет необходимости пользоваться функциями $F(t)$ или $f(t)$, а достаточно знать только числовые характеристики этих кривых.

Основной характеристикой положения кривой $f(t)$ является математическое ожидание $M[t]$, которое в нашем случае является средним сроком службы $T_{\text{ср}}$ (наработкой на отказ):

$$T_{\text{ср}} = \int_0^{\infty} t \cdot f(t)dt. \quad (6.7)$$

Основной характеристикой рассеивания случайной величины является дисперсия D или среднее квадратическое отклонение:

$$\sigma = \sqrt{D}, \quad (6.8)$$

где

$$D(t) = \int_0^{\infty} (T_{\text{ср}} - t)^2 f(t)dt. \quad (6.9)$$

Очевидно, что чем больше значение D (или соответственно σ), тем больше величина рассеивания сроков службы относительно их среднего значения $M[t]$.

Для оценки надежности работы машины, принимая за основную случайную величину время до возникновения отказа, можно определить и вероятность безотказной работы $P(t)$ в пределах заданного периода t . Для этого воспользуемся значением интегральной функции

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt \quad (6.10)$$

Вероятность безотказной работы $P(t)$ относится к событию, противоположному появлению отказа $F(t)$.

Поэтому

$$F(t) + P(t) = 1 \quad (6.11)$$

или

$$P(t) = 1 - F(t). \quad (6.12)$$

Тогда:

- функция распределения отказа:

$$F(t) = P(t < t_{\text{зад}}) = Q(t); \quad (6.13)$$

- плотность распределения:

$$f(t) = dQ(t)/dt \quad (6.14)$$

- вероятность безотказности изделия за время t :

$$P(t) = 1 - Q(t). \quad (6.15)$$

Интенсивность отказов (условная плотность вероятности отказов) – есть отношение $f(t)$ к $P(t)$:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} \quad (6.16)$$

График типовой функции интенсивности отказов машины изображен на рисунке 6.2.

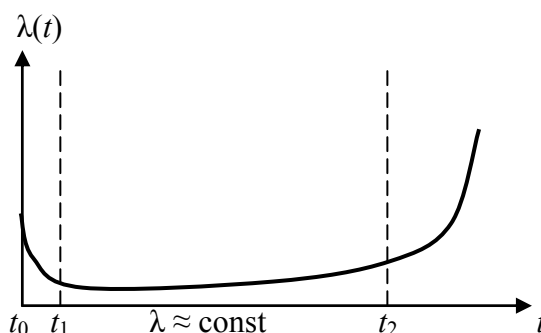


Рис. 6.2. Типовая функция интенсивности отказов машин.

Как видно из рисунка 6.2., типичный график функции интенсивности отказов содержит три участка:

1-й участок - убывающей интенсивности отказов ($t_0 - t_1$), который иногда называют периодом приработки или периодом ранних отказов. Появление отказов в этом периоде обычно вызывается конструктивными или производственными дефектами, например, отсутствие смазки в подшипниках, недостаточной затяжкой гаек и т.д..

2-й участок – условно постоянной интенсивности отказов ($t_1 - t_2$), называют периодом нормальной эксплуатации. Этот период начинается сразу же после периода приработки и заканчивается перед периодом износовых отказов. Отказы, появляющиеся в периоде нормальной эксплуатации, называют внезапными, так как они в основном появляются в случайные моменты

времени, или, другими словами, внезапно, непредсказуемо, из-за случайных причин, например нарушение электрического контакта в результате коррозии. Здесь необходимо отметить, что каждая новая машина немедленно после ее изготовления начинает стареть: с первого же момента эксплуатации она начинает изнашиваться, подвергается воздействию различных параметров внешней среды, в том числе агрессивных, и т.д.

В течение всего срока существования машины вероятность отказов из-за износа и старения непрерывно возрастает, даже если она вообще не эксплуатируется. Поэтому зависимость интенсивности отказов λ от времени t на 2-м участке не может быть одинаковой и должна незначительно возрастать. Однако в большинстве случаев этим ростом можно пренебречь и считать, что на этом участке $\lambda = \text{const}$.

3-й участок - период износовых отказов, начинается тогда, когда машина выработала свой ресурс, вследствие чего число отказов в этом периоде начинает резко возрастать, так как начинает резко возрастать количество причин для отказов. Однако такая ситуация возникает лишь при условии, что ресурс всех узлов и деталей машин имеет примерно одинаковую величину. Фактически же отдельные части машин, например, подшипники, могут иметь ресурс, значительно превышающий ресурс других деталей.

В зависимости от назначения, конструкции и условий эксплуатации ресурс машины, как искусственного изделия, может колебаться от десятков секунд (например двигатели космических аппаратов) до десятков, сотен и даже тысяч лет (например механические часы или водоводные системы в древнем Египте).

Технические параметры машины, определяющие интенсивность ее отказов, обычно задаются с таким расчетом, чтобы с запасом обеспечить необходимую вероятность выполнения того технологического процесса, на который она должна быть рассчитана.

При этом машина должна соответствовать конкретному перечню технических требований, которые обычно задаются в технических условиях (наиболее полном документе) или техническом паспорте машины, а пользователем должны выполняться требования к условиям ее эксплуатации.

Таким образом, в машинах в большинстве случаев имеются известные определенные перечни источников отказов с предсказуемыми последствиями. Интенсивность этих отказов может быть рассчитана либо определена экспериментально.

В связи с этим в конструкциях машин обычно предусматриваются определенные меры для уменьшения возможного ущерба при наиболее опасных случаях отказа, например установка предохранителей в электрических цепях, применение подушек безопасности в автомобилях, дублирование опасных узлов и систем контроля, систем сигнализации и т.д.

Кроме того, параметры машин, особенно выпускаемых серийно, характеризуются достаточно узким разбросом, в результате чего процессы их старения и износа характеризуются сравнительно высокой повторяемостью.

6.3. Закономерность вероятности отказов человека и человеческий фактор

6.3.1. Закономерность утомления человека

Организм человека в соответствии с 1-м и 2-м законами термодинамики биологических систем, как было указано выше, всегда находится в устойчивом неравновесном термодинамическом состоянии в соответствии со Вторым законом термодинамики.

При этом у него происходит принудительное чередование работоспособного и неработоспособного состояния в основном с периодом в одни сутки.

В течение этих суток организм человека лишь несколько часов, в зависимости от переносимой нагрузки, может находиться в работоспособном состоянии, после чего ему необходим отдых для восстановления.

За время работоспособного состояния график закономерности изменений вероятности отказов человека, заключающихся в ошибочных решениях или действиях, по форме практически совпадает с графиком, представленным выше на рис. 6.2.

Он также разделяется на три участка:

1-й участок графика характеризует период оперативной адаптации человека к трудовому процессу после отдыха.

2-й участок характеризует основной трудовой процесс, при котором осуществляется плавный, близкий к линейному, переход термодинамического состояния человека от слабо неравновесного к сильно неравновесному.

3-й участок характеризует сильно неравновесное термодинамическое состояние в результате усталости, при котором организм теряет свою работоспособность и переходит к отдыху.

Пример графика суточных изменений интенсивности отказов организма человека представлен на рис. 6.3.

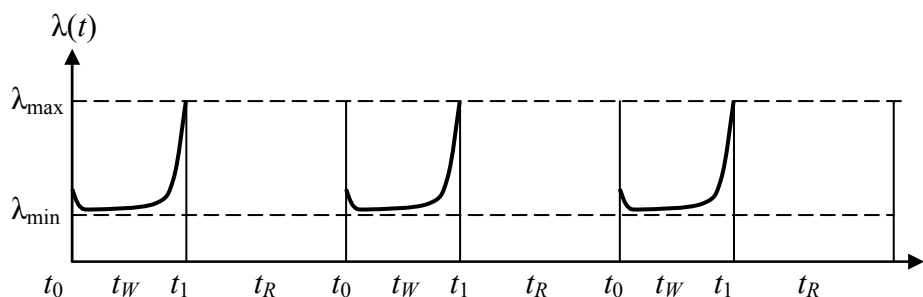


Рис.6.3. График суточных изменений интенсивности отказов организма человека
 t_W - работа; t_R - отдых.

Как видно из графика на рис. 6.3, каждые сутки в течение времени t_W работы системы «человек – машина» происходят изменения термодинамического состояния организма человека от слабо неравновесного в начале работы к сильно неравновесному в конце.

За время отдыха t_R в организме человека происходит полное восстановление его состояния и с начала следующих суток процессы повторяются.

Наиболее благоприятным временем работы с точки зрения интенсивности отказов в большинстве случаев является работа, начинающаяся с утра, так как перед этим за время сна обычно происходит наиболее полное восстановление всех функций организма от предыдущих нагрузок.

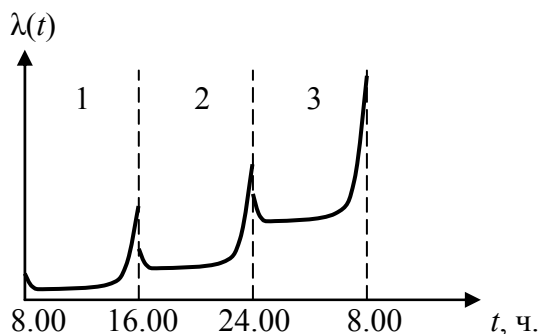


Рис. 6.4. Графики сравнительных суточных изменений интенсивности отказов человека при трехсменной работе.

$\lambda(t)$ – вероятность интенсивности отказов, t – время рабочих смен.

При работе в вечернюю смену трудовой процесс начинается уже при начальной усталости, возникшей за время активной жизнедеятельности между пробуждением и началом работы.

При работе в ночную смену трудовой процесс начинается уже при значительной усталости и к концу достигает максимальной величины.

На рис. 6.4 представлены графики изменений интенсивности отказов в процессе работ в 1, 2 и 3 смены.

Как видно из графиков на рис. 6.4., наименьшая интенсивность отказов приходится на первую смену, большая – на вторую, максимальная – на третью.

Среднее соотношение интенсивности отказов определяется условиями труда человека, техническими параметрами машины и условиями ее эксплуатации.

6.3.2. Природа и основные свойства человеческого фактора

Отказы человека в зависимости от степени состояния его организма, в принципе аналогичные изменениям состояния машин, приведенные в разделе 6.3.1, к большому сожалению, не являются исчерпывающими.

Еще одним источником отказов человека является человеческий фактор – свойство человека совершать заведомо неправильные и непредсказуемые действия либо принимать заведомо неправильные и непредсказуемые решения.

Природой человеческого фактора является наличие у человека огромного количества степеней свободы – огромное количество возможных разнообразных действий и решений, которые он может совершать или принимать под воздействием тех или иных источников информации,

поступающих к нему из внешней среды либо являющихся результатом деятельности его органов и систем.

Кроме того, исключительную роль здесь играет свойство фенотипической адаптации к тем или иным нагрузкам, в результате чего в ряде случаев его реакция на опасные ситуации становится гораздо ниже на малозначительные ситуации, к которым он не адаптирован.

В качестве примера можно привести аварию с самолетом ТУ-154, происшедшую 10 апреля 2010 года под Смоленском, в которой погиб президент Польши Леха Качиньский и многие другие руководители страны. Опытный летчик, понимая и будучи адаптирован к смертельной опасности при посадке самолета в плохих погодных условиях, не посмел послушаться президента, приказавшему ему произвести посадку.

Для обеспечения своей жизнедеятельности и обеспечения устойчивости своего неравновесного термодинамического состояния организм человека непрерывно воспринимает через свои органы чувств большой поток разнообразной информации как о собственном здоровье, так и его состоянии в окружающей среде, в том числе производственной.

В зависимости от количества, содержания, длительности, способа приема и условий получения информации и степени фенотипической адаптации к ним человек совершает те или иные действия и принимает те или иные решения.

Для обеспечения жизнедеятельности в живом организме в той или иной форме происходит анализ получаемой информации и он реагирует на наиболее приоритетные с позиций обеспечения максимальной устойчивости неравновесного термодинамического состояния – состояния максимальной безопасности.

У человека анализ получаемой информации осуществляется центральной нервной системой с помощью таких ее свойств, как внимание и сосредоточенность.

В настоящее время такие понятия, как внимание и сосредоточенность в основном относятся к такой научной дисциплине, как психология.

Однако эти понятия традиционно рассматриваются психологами с позиций, практически оторванных от принципов, присущих точным наукам, в частности физике.

Величину вероятности отказов из-за человеческого фактора P_N можно представить как определенную долю общей вероятности отказов системы «человек – машина» P_N в виде выражения:

$$P_N = \sum k_N \cdot P, \quad (6.17)$$

где k_N – коэффициент значимости человеческого фактора в различных областях техносферы.

Для уменьшения значений k_N необходим тщательный учет биологических особенностей организма человека в процессе его трудовой деятельности.

Параметры человека, определяющие интенсивность его отказов, устанавливаются и оцениваются значительно сложнее: индивидуальные

особенности организмов характеризуются очень большим разбросом роста, массы, работы внутренних органов, реакций на раздражители и нагрузки, умственных способностей, психологией и так далее.

Поэтому для выполнения работы с минимальной вероятностью отказов его нервная система должна быть настроена соответствующим образом: чувствительность к внешним и внутренним раздражителям, непрерывно воздействующим на нее, и не связанным с работой, была бы минимальна, в то время как чувствительность к информации о выполняемой работе максимальна.

Иными словами, человек должен быть полностью сосредоточен на выполнении работы.

Однако из-за многочисленных сложных физиологических процессов, одновременно происходящих в организме человека, большого множества случайных источников информации, поступающих из внешней среды, и недолговременной работоспособности работа человека характеризуется низкой степенью надежности при любых процессах его трудовой деятельности.

В связи с этим все действия человека при выполнении им производственных заданий должны по мере возможности контролироваться.

В соответствии со сложившейся мировой производственной практикой в технологических процессах производства продукции всегда предусматриваются различные простые и многоступенчатые способы контроля и испытаний изготовленной продукции, начиная от визуального контроля и контроля выполнения технологических операций и заканчивая специальными контрольными прогонами, климатическими испытаниями и другими мероприятиями для выявления возможных скрытых дефектов.

При контроле передвижения транспортных средств в определенных случаях, например при эксплуатации воздушного и железнодорожного транспорта, предусмотрен контроль движения с помощью диспетчерских служб, наличием второго пилота или машиниста.

При контроле движения автотранспорта используются специальные автоматизированные системы контроля, дорожная полиция и т.д.

Другим путем уменьшения вероятности ошибок является дублирование источников информации и введение ограничений в выборе решений.

Например, при управлении автомобилем путем организации дорожного движения выбирается такой режим и условия движения транспортных средств, которые бы в максимальной степени обеспечивали его безопасность: ограничение скорости, дублирование светофоров и дорожных знаков, установка дополнительных источников информации и предупреждающих табличек, дорожная разметка.

Глава 7. Пути оптимизации функционирования систем «человек-машина»

Применение законов функционирования биологических систем и их сочетание с физическими законами неживой природы, на основе которых человеком созданы многочисленные орудия труда, позволило найти целый ряд

неочевидных, принципиально новых эффективных решений, направленных на оптимизацию работы систем «человек-машина». Как показывают различные исследования поведения человека в тех или иных ситуациях, его реакции на различные источники нагрузки достаточно часто не соответствуют оптимальным решениям, к которым бы он пришел в другой обстановке – так называемые «лестничные мысли». В большом количестве случаев это связано с тем, что человек по различным причинам неадекватно реагирует на возникшую ситуацию. Например человек, много лет ездивший на автомобиле «Жигули» и очень довольный этой машиной, не представляет, что могут быть автомобили значительно более удобные, например «Вольво» или «Мерседес».

И только начав ездить на них, он поймет разницу.

Таким образом, объективную характеристику условий труда можно получить лишь путем соответствующих физиологических измерений и объективных оценок, в результате которых могут быть выявлены истинные источники нагрузок и определены пути наиболее эффективных мероприятий, направленных на улучшение условий труда.

Ниже приведены три примера таких решений.

7.1. Усовершенствование рабочего места авиадиспетчера

Надежность работы авиадиспетчеров, из-за ошибок которых периодически происходят различные авиационные катастрофы, является одной из наиболее актуальных проблем.

Для повышения надежности работы авиадиспетчеров, кроме усовершенствования технического оснащения, соответствующим образом регламентируется и режим их труда.

Например в России режим труда авиадиспетчеров регламентирован соответствующим приказом Министерства транспорта.

На рис. 7.1 показана рабочая поза авиадиспетчера за типовым рабочим местом, а на рис. 7.2 пример отображения информации о воздушном движении на экране дисплея.



Рис. 7.1 Типовое рабочее место авиадиспетчера



Рис. 7.2. Отображение информации о воздушном движении на экране дисплея

Этим приказом, например, предусмотрено, что диспетчеру, осуществляющему непосредственное управление воздушным движением за диспетчерским пультом, оборудованным видеодисплейным терминалом, после двух часов непрерывной работы предоставляется специальный перерыв продолжительностью не менее 20 минут. Кроме того, при интенсивности воздушного движения более допустимой, определяемой в установленном порядке, диспетчеру после каждого часа работы предоставляется дополнительный специальный перерыв продолжительностью 10 минут. В том случае, когда время предоставления специального перерыва совпадает со временем предоставления перерыва для отдыха и питания, специальный перерыв не предоставляется.

Таким образом, авиадиспетчерам с учетом напряженности их труда в процессе работы предоставляется дополнительное время для отдыха.

Однако это дополнительное время не компенсирует биологические затраты организма авиадиспетчеров, так как по заключению специалистов, у них наблюдается ускоренное старение организма и другие специфичные заболевания.

Цель проведенных исследований заключалась в определении состава и объективной количественной оценки функциональных сдвигов организма авиадиспетчеров, вызываемых их работой, и поиске наиболее эффективных путей улучшения условий их труда.

В результате выполненных работ было установлено следующее.

Рабочие места авиадиспетчеров содержат различные виды оборудования и различные виды их компоновок. Обычно в их состав входит столешница с встроенной в нее аппаратурой, монитор, шкаф, так же содержащий аппаратуру, и информационное табло в верхней части шкафа.

При работе за таким рабочим местом авиадиспетчеру приходится длительное время сидеть в вынужденной позе с высоко поднятой головой, периодически поднимать взор на информационное табло, с ограниченным положением ног.

В результате предварительного медицинского обследования авиадиспетчеров было принято решение о проведении измерений таких показателей, как психологический тест «Внимание», систолическое и диастолическое артериальные давления, тремор, температура тыльной стороны кистей рук, пульс и ряд показателей пульсовой волны: размах кардиоинтервала, фаза интенсивного сокращения, фаза экстремальной нагрузки, фаза снижения нагрузки, фаза завершения систолы, а так же эргоемкость и удельная эргоемкость.

Для исследований были применены специальные компьютерные устройства и программы, позволяющие произвести необходимые физиологические исследования максимально оперативно, а также компьютерная программа «Loqus 2003.1» для определения эргоемкости и специальная учебная компьютерная программа для авиадиспетчеров «Навигатор», имитирующая на экране монитора движение воздушных судов и различные аварийные ситуации: возгорание двигателя, опасное сближение и т.д.

Как показали результаты исследований авиадиспетчеров, работающих на типовом рабочем месте, основной причиной их быстрого утомления оказалась не интенсивная нагрузка, как предполагалось ранее, хотя при испытаниях имитировались различные аварийные ситуации, а неудобная конструкция рабочего места, в результате чего эргоемкость фазы экстремальной нагрузки составила 9 D.



Рис. 7.3. Макет нового рабочего места авиадиспетчеров

На основании полученных результатов была разработана новая конструкция рабочего места, внешний вид которой представлен на рисунке 7.3.

Как видно из рисунка 7.2, по сравнению с типовым, на новом рабочем месте бы уменьшена высота и толщина столешницы, предусмотрен вырез для обеспечения необходимой позы оператора, монитор опущен вниз и соответствующим образом наклонен, введена подставка для ног.

Основные конструктивные отличия нового рабочего места заключались в следующем.

Форма выреза столешницы выполнена с учетом антропометрических таблиц, чтобы обеспечить нормальную циркуляцию крови верхних конечностей.

Высота и угол наклона монитора определены таким образом, чтобы угол взора авиа-диспетчера на его нижний край составлял 60^0 .

Специальная глубокая – 800 мм – подставка для ног, имеющая угол наклона 15^0 , обеспечивает авиадиспетчеру возможность менять в больших пределах положение ног в процессе работы, уменьшая тем самым степень его утомления из-за гиподинамии.

Кроме того, из рабочего места было исключено верхнее информационное табло как нарушающее мозговое кровообращение.

Все эти изменения в конструкции нового рабочего места были направлены на создание наиболее оптимальных условий работы авиадиспетчера: удобную рабочую позу, которую можно менять в процессе работы, обеспечивая необходимую двигательную активность и другие условия.

В результате испытаний нового рабочего места было установлено, что его эргономкость равна $3D$, т.е. в три раза меньше типового.

Это означает, что степень утомления авиадиспетчеров на новом рабочем месте уменьшилась в 3 раза и во столько же раз уменьшилось время восстановления их функциональных сдвигов.

Таким образом, путем решения проблемы улучшения условий труда авиадиспетчеров оказалось не уменьшение напряженности их труда, а создание физически удобного рабочего места.

7.2. Усовершенствование переносных пневматических перфораторов

Гигиенические условия работы бурильщиков, осуществляющих бурение шпуров с помощью переносных пневматических перфораторов в шахтах и карьерах характеризуются следующим:

- физические усилия, прилагаемые бурильщиками к рукояткам перфораторов при бурении вниз, достигают 700 – 800 Н при норме 200 Н;
- вибрация рукояток перфораторов, измеренная с помощью аппаратуры фирмы «Брюль и Кьер» достигает значений, до 30 раз превышающих допустимые;
- шум на рабочих местах составляет уровни до 117 дБА при норме в 85 дБА.

При этом многочисленные попытки разработчиков уменьшить уровень вибрации с помощью различных конструкций виброгасящих устройств, увеличить скорость бурения изменением конструкции перфораторов оказывались безуспешными. Для решения этой проблемы нами были проведены исследования с использованием способов объективной количественной оценки условий труда бурильщиков.

Результаты этих исследований показали следующее.

При анализе эргоемкости функциональных сдвигов организма бурильщиков было установлено, что время восстановления вибрационной чувствительности происходит очень медленно, что свидетельствует о непрерывно развивающейся вибрационной болезни.

Исследования собственно процесса бурения показали, что чистая скорость бурения значительно ниже максимальной из-за недостаточного усилия подачи, необходимого для компенсации реактивных сил, направленных вверх, сопровождающих работу перфоратора. В то же время изменить технологию процесса бурения, например уменьшить массу перфоратора и увеличить частоту ударов его механизма невозможно из-за свойств используемых в его конструкции материалов. Увеличить массу перфоратора и тем самым уменьшить необходимую силу бурения также невозможно, так как при этом теряется свойство перфоратора как переносной машины, что было подтверждено результатами испытаний перфораторов с утяжелителями. Таким образом выяснилось, что параметры переносных пневматических перфораторов не соответствуют физическим возможностям человека по усилию подачи и являются предельными по массе.

Исходя из полученных результатов исследований была сформулирована принципиально другая задача перед разработчиками: механизации усилия подачи при сохранении общей массы переносного перфоратора.

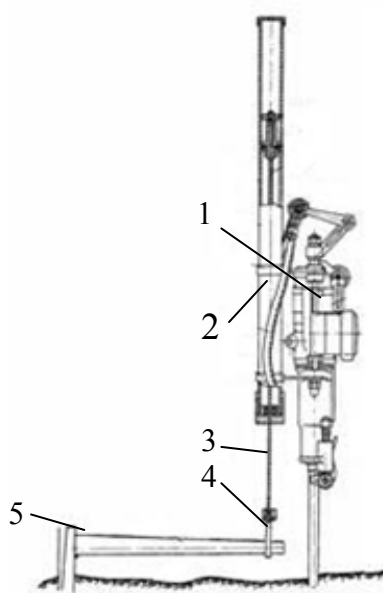


Рис. 7.4. Устройство для бурения шпуров вниз

Эта проблема была решена для двух вариантов бурения шпуров: направленных вертикально вниз с использованием обычного перфоратора, а также горизонтальных и наклонных с использованием обычного перфоратора на пневмоподдержке.

На рис. 7.4 представлен общий вид устройства для бурения вниз с механизированным усилием подачи.

Это устройство содержит более легкий перфоратор 1, чем обычно применяющийся для этой цели, на который установлено подающее устройство 2, представляющее собой цилиндр с поршнем, к которому прикреплен трос 3 с крюком 4 на конце. Кроме того, устройство дополнено анкером 5.

Работа устройства заключается в следующем.

Анкер 8 вставляют в ранее пробуренный шпур, затем перфоратор с буровой штангой устанавливают вертикально на поверхности почвы на расстоянии, соответствующем паспорту буровзрывных работ – обычно около 700 мм, включают перфоратор и, незначительно нажимая на него, производят забуривание шпура на глубину нескольких десятков миллиметров. Затем крюк 11 зацепляют за анкер 8 и, включая подачу сжатого воздуха в цилиндр подающего устройства 2, приводят в движение поршень, помещенный в нижней части цилиндра. Передвигаясь под действием сжатого воздуха вверх, поршень натягивает трос, сцепленный крюком 11 с анкером 8, который за счет создавшегося рычага заклинивается в соседнем шпуре 9. По мере передачи силы натяжения троса на анкер создается усилие, подающее перфоратор вниз. Внутренний диаметр цилиндра выполнен из расчета того, что при давлении на него сжатого воздуха величиной 0.5 мПа создается усилие подачи, которое с учетом веса устройства соответствует оптимальному – при котором достигается максимальная скорость бурения. Таким образом, в процессе бурения основной части шпура (глубиной до 3.5 м) усилие подачи осуществляется подающим устройством без применения физической силы бурильщика и без воздействия на его руки вибрации, с максимальной скоростью.

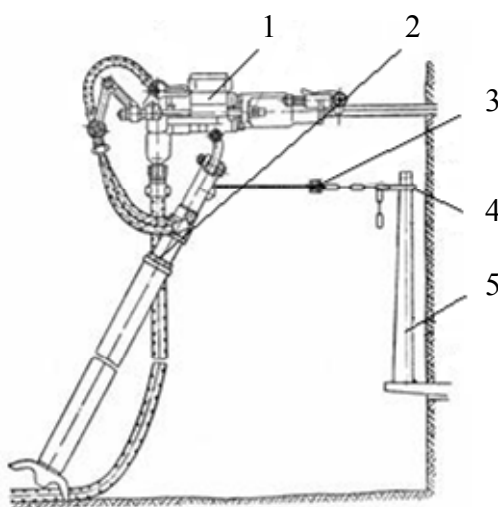


Рис. 7.5. Устройство с механизированной подачей для бурения горизонтальных и наклонных шпуров

При этом так же уменьшает и время воздействия шума.

Аналогично была решена проблема и с механизацией усилия подачи при использовании пневмоподдержки при бурении горизонтальных и наклонных шпуров.

Устройство для бурения горизонтальных и наклонных шпуров с механизированной подачей представлено на рис. 7.5.

Устройство состоит из перфоратора 1, установленного на пневмоподдержку 2.

В пневмоподдержке 2 размещен цилиндр с поршнем, соединенным посредством троса 3 и крюка 6 с анкером 7, вставленным в ранее пробуренный шпур.

В начале работы производится забуривание только с помощью пневмоподдержки, а уже затем включается подающее устройство путем подачи сжатого воздуха в цилиндр 4.

Под действием сжатого воздуха поршень в цилиндре начинает двигаться вниз, натягивает трос 3, закрепленный на рычаге анкера 7 с помощью крюка 6, и заклинивает анкер. При этом буровая штанга подается в направлении бурения с силой, необходимой для обеспечения максимальной скорости бурения.

Регулировка давления сжатого воздуха в цилиндре осуществляется централизованно с помощью регулятора, установленного на ручке перфоратора.

Таким образом, и в этом случае обеспечивается оптимальный режим бурения шпуров без участия физической силы бурильщика и при сохраненной массе буровой установки при разных направлениях бурения, как горизонтальном, так и наклонном.

Дальнейшие исследования в этом направлении показали, что имеется целый ряд проблем, связанных с технологией изготовления и эксплуатации подающих устройств. Однако в настоящее время уже найдено соответствующие технические решения и есть основания полагать, что переносные перфораторы с подающими устройствами найдут широкое применение в горном деле и строительстве.

7.3. Усовершенствование технологии производства радиоэлектронной продукции

Проблема технологии регулировки радиоэлектронной аппаратуры заключалась в следующем.

Задача радиорегулировщика состояла в регулировке размаха синусоидального сигнала электронного усилителя, наблюдаемого на экране осциллографа. Для этого он должен был предварительно произвести регулировку осциллографа так, чтобы линия, соответствующая «нулю», совпадала с нулевой отметкой шкалы, нанесенной на экран осциллографа.

А затем, путем регулировки усиления усилителя, совместить верхние и нижние границы изображения синусоидального сигнала с соответствующими линиями шкалы, как это видно на рис. 7.6 а).

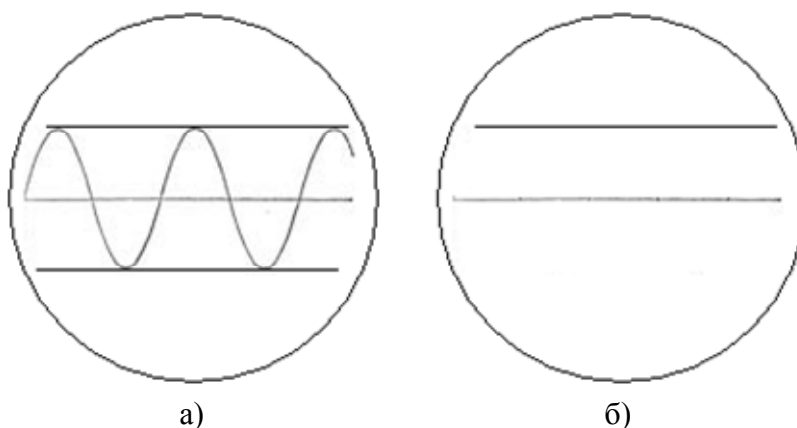


Рис. 7.6.

а) – изображение синусоиды, б) – изображение уровней синусоиды

Однако, поскольку сигнал синусоиды был не идеально симметричным, а глаза оператора не обладали необходимой разрешающей способностью для точного учета этой асимметрии, на осциллографе при регулировке размаха сигнала постоянно смещалась нулевая линия, в результате чего требовалось многократное повторение регулировок как осциллографа, так и усилителя для получения необходимого результата.

Такая ситуация приводила регулировщиков к сильному психологическому дискомфорту, и, как результат - к быстрому утомлению, большому проценту брака и низкой производительности труда, что было подтверждено физиологическими исследованиями состояния организма регулировщиков при выполнении ими заданий с помощью психометрических тестов компьютерной программы «Loqus 2003.1.En». Для решения этой проблемы необходимо было изменить технологию регулировки, обеспечивая метрологическую однозначность выполняемых регулировок.

В результате была разработана технология регулировки, при которой нулевое значение осциллографа было фиксированным, а уровень сигнала устанавливался не по размаху синусоиды, а по его выпрямленному значению. При этом на экране осциллографа вместо синусоиды было сформировано изображение двух линий: средняя соответствовала точному нулевому напряжению, верхняя – уровню сигнала, как это показано на рис. 7.6 б). Благодаря такому техническому решению удалось исключить необходимость многократной подрегулировки осциллографа и гарантировать точную настройку при одноразовой регулировке, значительно уменьшив при этом напряженность выполняемых работ.

Был проведен так же ряд и других разработок для обеспечения оптимальных условий функционирования систем «человек – машина»: в области технологии производства радиоэлектронной продукции, автомобильного и морского транспорта, строительства, компьютерных рабочих мест и некоторых других. И в этих случаях тщательный учет биологической

природы человека позволял находить нетрадиционные решения, эффективно повышая эргономические параметры рабочих мест.

Как видно из приведенных примеров, учет биологической природы человека, его физиологических и психологических свойств в ряде случаев позволил значительно улучшить условия труда, эффективность и надежность работы систем «человек-машина», особенно при правильном учете того факта, что человеческий фактор в системе «человек – машина» - ее слабое звено.

Заключение

Представленные в книге материалы описывают общие законы термодинамики биологических систем, свойства систем «человек – машина», основанные исключительно на физических и биологических законах и свойствах природы, некоторые из которых установлены впервые.

Именно это обстоятельство позволяет не только отразить физическую сущность происходящих процессов как отдельно у человека и у машины, так и при их взаимодействии, но и дать им объективную, метрологически обоснованную количественную оценку, определить главные, определяющие параметры системы «человек – машина» и установить основные пути их совершенствования.

Более детальные исследования в этой области еще предстоит сделать в будущем.

Литература

1. Бауэр Э.С. Теоретическая биология / Э.С. Бауэр. СПб. Изд-во Росток. 2002. 352 с.
2. Гленсдорф П..Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. /П. Гленсдорф, И. Пригожин. М. Мир. 1973. С 280.
3. Горбачев В.В. Концепции современного естествознания. В 2 ч. Учебное пособие / В.В.Горбачев. М. Издательство МГУП. 2000. 274 с.
4. Доброборский Б.С. Способ оценки величины воздействия на организм человека различных нагрузок / Б.С. Доброборский, Е.Н. Кадыскина. Патент РФ №2519576. 2000. Бюллетень №33.
5. Доброборский Б.С. Термодинамика биологических систем. Под ред. проф. Е.С. Мандрыко. / Б.С. Доброборский. Учебное пособие. СПб. 2006. 52 с.
6. Комаров Ф.И. Хронобиология и хрономедицина / Ф.И. Комаров, С.И. Рапопорт. Триада-Х. М. 2000. 488 с.
7. Пригожин И. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур / И. Пригожин, Д. Кондепуди. Мир. 2002. 462 с.

Оглавление

Введение

Глава 1. Современные принципы оценки условий и безопасности труда

1.1. Человеческий фактор как источник повышенной опасности

1.2. Принципы гигиенического нормирования

1.3. Система стандартов безопасности труда

1.4. Принципы эргономических требований и эргономического обеспечения

1.5. Анализ технических регламентов

- 1.6. Проведение обучения, инструктажей по охране труда и обучения рабочих безопасным приемам труда
- 1.7. Основные виды машин и их взаимодействие с оператором в системе «человек – машина»
 - 1.7.1. Определение системы «человек – машина»
 - 1.7.2. Основные параметры системы «человек – машина»
 - 1.7.3. Принципы взаимодействия человека с инструментами и машинами
 - 1.7.4. Основные виды машин и их взаимодействия с человеком
- Глава 2. Основные положения термодинамики материальных систем
 - 2.1. О становлении термодинамики как науки
 - 2.2. Основные термины и положения традиционной термодинамики
 - 2.3. Общие сведения о равновесной термодинамике
 - 2.3.1. Первое начало термодинамики
 - 2.3.2. Второе начало термодинамики
 - 2.3.3. Третье начало термодинамики
 - 2.4. Общие сведения о неравновесной термодинамике
 - 2.4.1. Основные термодинамические свойства материи
 - 2.4.2. Пассивные и активные неравновесные термодинамические системы
 - 2.4.2.1. Анализ основных свойств пассивных термодинамических систем
 - 2.4.2.2. Анализ основных свойств активных термодинамических систем
 - 2.4.2.3. Самоорганизация неживой материи
- Глава 3. Основные положения термодинамики биологических систем
 - 3.1. Общие сведения о фотосинтезе и хемосинтезе
 - 3.1.1. Фотосинтез
 - 3.1.2. Хемосинтез
 - 3.2. Первый закон термодинамики биологических систем
 - 3.3. Биологические ритмы как способ существования живой материи
 - 3.3.1. Историческая справка
 - 3.3.2. Природа биоритмов. Второй закон термодинамики биологических систем
 - 3.3.3. Собственная и принудительная частота биоритмов
- Глава 4. Теоретические основы адаптации
 - 4.1. Общие сведения об адаптации
 - 4.2. Сущность процессов фенотипической адаптации
 - 4.3. Принципы работы механизма фенотипической адаптации
 - 4.4. Основные закономерности реакций на нагрузки
 - 4.4.1. Закон действующих масс
 - 4.4.2. Реакции на одиночную нагрузку
 - 4.4.3. Реакции организма на периодическую нагрузку
 - 4.5. Основные закономерности фенотипической адаптации
 - 4.5.1. Оперативная фенотипическая адаптация
 - 4.5.2. Устойчивая фенотипическая адаптация
 - 4.5.2.1. Устойчивая фенотипическая адаптация при воздействии постоянной одиночной нагрузки
 - 4.5.2.2. Устойчивая фенотипическая адаптация при воздействии длительной периодической нагрузки
 - 4.6. Фенотипическая адаптация и окружающая среда
 - 4.6.1. Основные закономерности изменений параметров окружающей среды
 - 4.6.2. Внешняя среда и жизнедеятельность живых организмов
- Глава 5. Гигиенические и эргономические показатели системы «человек-машина»
 - 5.1. Содержание гигиенических и эргономических показателей
 - 5.2. Способы количественной оценки воздействия на организм человека различных нагрузок
 - 5.2.1. Бальная оценка
 - 5.2.2. Оценка по степени риска
 - 5.2.3. Оценка методом биоиндикации

- 5.2.4. Оценка по анкетным опросам
- 5.2.5. Оценка по способу Доброборского-Кадыскиной
- 5.3. Методика определения основных функциональных сдвигов
- 5.4. Методика определения времени восстановления функциональных сдвигов
- 5.5. Неявные функциональные сдвиги
- Глава 6. Надежность работы систем «человек-машина». Человеческий фактор
 - 6.1. Основные теоретические законы распределения отказов
 - 6.2. Закономерность вероятности отказов машины
 - 6.3. Закономерность вероятности отказов человека и человеческий фактор
 - 6.3.1. Закономерность утомления человека
 - 6.3.2. Природа и основные свойства человеческого фактора
- Глава 7. Пути оптимизации функционирования систем «человек-машина»
 - 7.1. Усовершенствование рабочего места авиадиспетчера
 - 7.2. Усовершенствование переносных пневматических перфораторов
 - 7.3. Усовершенствование технологии производства радиоэлектронной продукции
- Заключение