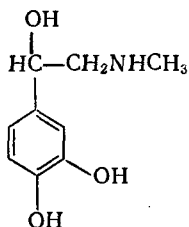
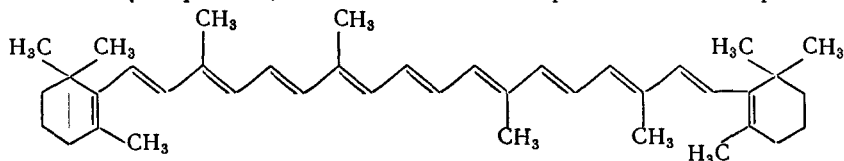


сердечную деятельность, — адреналин со сравнительно простой структурой

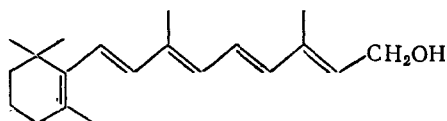


Гормональная активность определяется химической функциональностью немногочисленных атомных групп. Химические различия тестостерона и кортизона малы, но их физиологические функции совершенно различны. Структура и свойства гормонов отчетливо демонстрируют биологическое значение индивидуальных молекулярных структур.

В заключение приведем структуру нециклической сопряженной цепи β -каротина, ответственного за красный цвет моркови:



В организме каротин в результате окисления превращается в витамин А, участвующий в первичном акте зрительного восприятия,



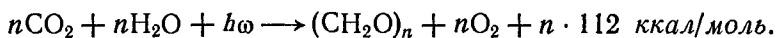
Естественно, что здесь нельзя изложить подробности, относящиеся к структуре и свойствам громадного числа природных и физиологически активных соединений. Биологическая роль многих из них весьма существенна. Витамины, гормоны, кофакторы можно объединить общим термином *биорегуляторы*. Эти вещества регулируют биохимические процессы в клетке и в организме. Подробные сведения о биорегуляторах приведены в современных курсах биохимии, например в [33].

§ 2.10. ВАЖНЕЙШИЕ БИОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Основные биохимические процессы, определяющие функционирование клетки, организма как открытых систем, — это прежде всего биоэнергетические процессы. Свободная энергия, необходимая для работы клетки, т. е. для биосинтеза биополимеров

и функциональных малых молекул, для деления клетки, для механического движения клетки и ее органоидов, для активного транспорта и т. д. — химическая энергия. Ее источником служит в конечном счете солнечный свет. Энергия квантов света трансформируется в химическую в процессе фотосинтеза в зеленых растениях. Химическая энергия запасается в молекулах АТФ (см. стр. 95), являющихся универсальными аккумуляторами энергии для подавляющего большинства биологических процессов. Структурная формула АТФ приведена на стр. 86. Две из трех фосфатных связей — *макроэргические связи*; при их гидролитическом расщеплении выделяется свободная энергия порядка 10 ккал/моль. В процессе фотосинтеза АТФ образуется из АДФ и неорганического фосфата. Это превращение требует донора электронов, а также протонов, отдаваемых водой. Одновременно с «зарядкой аккумулятора», с образованием АТФ, происходит восстановление одного из переносчиков электронов НАДФ до НАДФ-Н. Химическая энергия, запасенная в АТФ, используется в растениях для синтеза углеводов из CO_2 и H_2O , для которого, кроме источника энергии, требуется еще и восстанавливающий агент НАДФ-Н. В присутствии АТФ и НАДФ-Н синтез углевода осуществим и в отсутствие света.

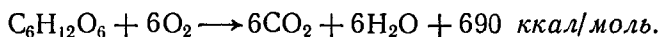
Суммарную реакцию фотосинтетического образования углевода можно записать в виде



При образовании глюкозы $n = 6$. Процесс этот весьма эффективен — до 75% энергии света, попадающего на молекулу хлорофилла, превращается в химическую энергию.

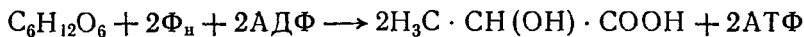
Энергия световых квантов $h\nu$ прежде всего превращается в энергию АТФ. Далее происходит вторичный процесс образования углевода, в молекуле которого также запасена химическая энергия. Эта энергия извлекается в процессе дыхания и вновь трансформируется в энергию АТФ.

Дыхание необходимо как *автотрофным* (главным образом фотосинтезирующим), так и *гетеротрофным* (т. е. питающимся автотрофами и друг другом) организмам. Дыхание в биохимическом смысле сводится к окислению углеводов. При окислении глюкозы выделяется большое количество энергии



Первая фаза окисления углевода называется *гликолизом*. В этой фазе глюкоза расщепляется в конце концов на две молекулы молочной кислоты (лактата). Установлено не менее 11 стадий

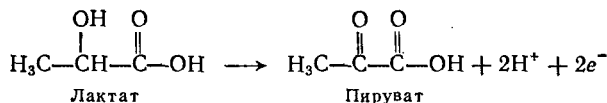
гликолиза, требующих не менее 11 специальных ферментов. Суммарно первую фазу этой реакции можно представить в виде



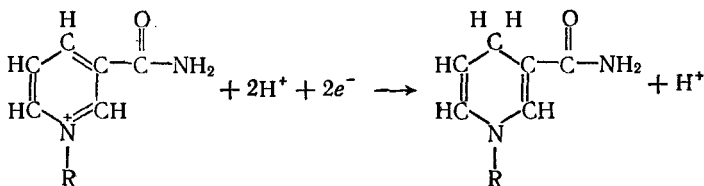
(Φ_n — неорганический фосфат). Значит, при образовании двух молекул лактата из молекулы глюкозы происходит *фосфорилирование* — из двух молекул АДФ и фосфата образуются две молекулы АТФ. При этом идет восстановление НАД до НАД-Н и обратный процесс окисления НАД-Н до НАД. Термодинамический баланс процесса сводится к выделению 56 ккал/моль и запасанию 20 ккал в двух молях АТФ.

После расщепления глюкозы до молочной кислоты большая часть оставшейся в ней энергии извлекается во второй фазе процесса — в окислении лактата до CO_2 и H_2O кислородом воздуха. Первая фаза гликолиз — *анаэробное* (т.е. протекающее без участия кислорода) превращение глюкозы, вторая фаза — *аэробное* превращение, т.е. собственно окисление.

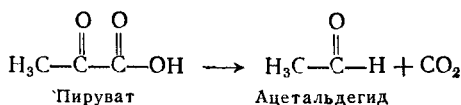
Молочная кислота окисляется до пировиноградной (пирувата):



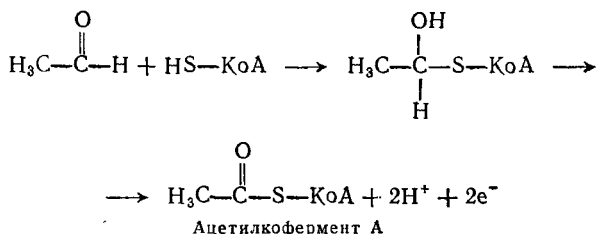
Этот процесс катализируется ферментом лактатдегидрогеназой (ЛДГ), работающим с участием кофермента¹ НАД. Функциональная группа НАД — ниатин (см. стр. 96) — способна принимать два протона и два электрона от лактата. При этом НАД восстанавливается до НАД-Н и освобождается один протон:



Пируват далее подвергается декарбоксилированию, т.е. теряет молекулу CO_2 :



Ацетальдегид взаимодействует со сложной молекулой кофермента А (стр. 96), обозначаемой КоА—SH,



и в таком виде вступает в цикл превращений, называемый *циклом трикарбоновых кислот* или *циклом Кребса* по имени биохимика, расшифровавшего эту сложную последовательность превращений (рис. 2.17). Цикл состоит из цепи реакций, начинающейся с образования лимонной кислоты из уксусной и щавелевоуксусной (оксалоацетат) кислот. Путем ряда дегидрирования и декарбоксилирований цитрат теряет два атома углерода в виде CO_2 и вновь образует щавелевоуксусную кислоту. Начинается новый оборот цикла.

На стадии образования ацетил-КоА в процесс метаболизма, наряду с углеводами (гексозами), вступают продукты гидролитического расщепления белков и жиров — аминокислоты, жирные кислоты, глицерин. Это представлено схематически в табл. 2.6 [35].

Как же происходит выделение энергии в этих метаболических процессах? Электроны, удаляемые на разных стадиях цикла Кребса, а также на двух предшествующих ему стадиях (образование лактата и пирувата), передаются по дыхательной цепи переносчиков. В эту цепь входит сложный комплекс ферментов и коферментов, а именно НАД, фермент из группы флавопротеидов (ФП) и ряд железосодержащих ферментов — цитохромы *b*, *c*, *a*, *a*₃. Электроны, проходя по цепи, передают свою энергию молекулам АТФ — происходит *окислительное фосфорилирование*. Открытие этого важнейшего явления связано с именами Энгельгардта [36] и Белицера [37, 38]. В конечном счете электроны переносятся на кислород, восстанавливаемый до воды.

При фотосинтезе кислород образуется из воды. Превращения питательных веществ при дыхании сводятся к переносу электронов на кислород и к его восстановлению в воду. Таким образом, два эти процесса обратны друг другу.

Дыхание, фотосинтез являются точно согласованными многостадийными процессами, требующими участия ряда ферментов. В обоих случаях необходима определенная структурная организация ферментных систем — такие процессы строго локализова-

ны в специализированных органоидах клеток. Фотосинтез осуществляется в *хлоропластах*, дыхание — в *митохондриях*.

Окисление глюкозы происходит и помимо циклов Кребса (цикла трикарбоновых кислот) в так называемом *пентозном цикле*.

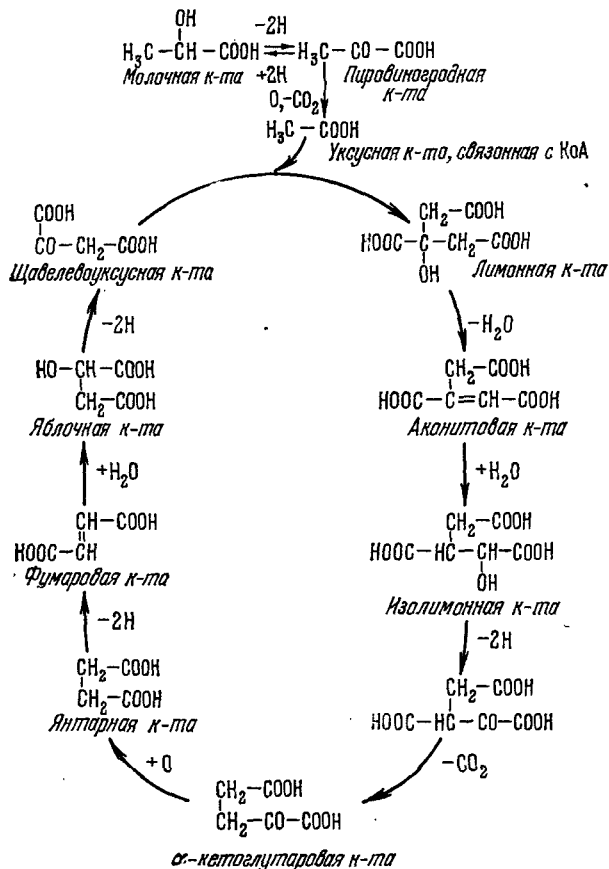
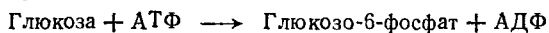


Рис. 2.17. Цикл трикарбоновых кислот (цикл Кребса).

Этот процесс уже не сопровождается фосфорилированием АДФ, но также служит источником энергии.

Глюкоза фосфорилируется АТФ:



и глюкозо-6-фосфат вступает в цепь превращений с участием НАДФ. Суммарный процесс можно записать в виде

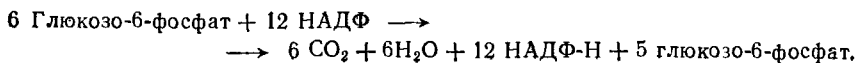
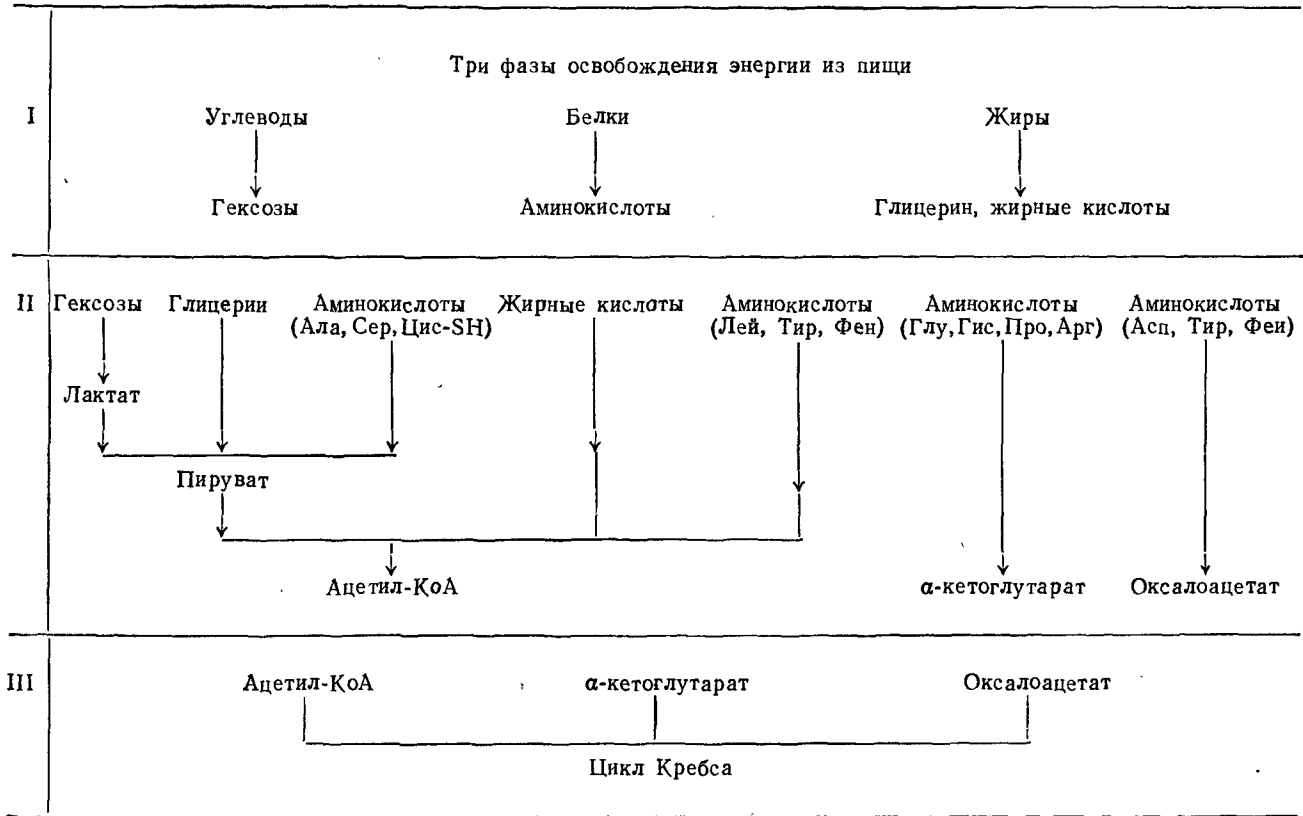


Таблица 2.6



НАДФ-Н, равно как и НАД-Н, наряду с АТФ, — общие для всех клеток первичные аккумуляторы и переносчики химической энергии. Еще один вид такого переносчика, функционирующий в клетках растений и фотосинтезирующих бактерий — ферредоксин. Этот железосодержащий белок обладает высокой восстановительной способностью, т. е. имеет высокий отрицательный окислительно-восстановительный потенциал. Он также участвует в восстановлении НАДФ до НАДФ-Н.

Синтетические процессы в клетках — синтез белков, нуклеиновых кислот, пуринов, пиримидинов, липидов, сахаров и др. представляют собой, как правило, *эндергонические* процессы, т. е. процессы, требующие затраты свободной энергии. Биосинтез осуществляется в открытой термодинамической системе — клетке в результате сопряжения с *экзергоническими* процессами гидролиза АТФ и окисления НАД-Н, НАДФ-Н и ферредоксина, в ходе которых освобождается энергия. В конечном счете восстановленные коферменты также возникают за счет АТФ — наиболее универсального аккумулятора энергии (глюкоза фосфорилируется АТФ). Основные биосинтетические реакции идут с участием ферментов киназ или синтетаз.

Химическая энергия в клетке используется не только для химических реакций. Одновременно реализуется сложная совокупность физико-химических процессов, в которых химическая энергия трансформируется в механическую, осмотическую, электрическую работу и в световую энергию (биолюминесценция). Исследование физической сущности этих процессов превращения энергии — одна из главных задач биофизики. Подробные и во многом исчерпывающие сведения о биохимических реакциях, сопровождающихся запасением и расходом химической энергии, приведены в [33, 39—44].

§ 2.11. КВАНТОВАЯ БИОХИМИЯ

Химические и физические свойства атомов и молекул определяются строением их электронных оболочек, взаимодействующих с атомными ядрами. В основе химии и, тем самым, биохимии и биологии лежит квантовая механика. Общая теория строения и свойств молекул называется квантовой химией, соответственно область квантовомеханических исследований строения и свойств биологических функциональных молекул именуется квантовой биохимией.

Обладают ли такие молекулы и, прежде всего, биополимеры специальными электронными свойствами, отличающими их от любых других молекул и ответственными за их биологическое значение?

В современной биофизике имеется направление, представители которого ищут объяснение биологических явлений, реали-