

К.П. Иванов

Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Современные медицинские проблемы энергообмена у человека

В живом организме 72% энергообмена происходит во внутренних органах, которые составляют всего 5–6% от общей массы тела. Остальная энергия затрачивается за счет кожи, костей, соединительной ткани, покоящихся мышц. Уровень потребления энергии определяет общее физиологическое состояние организма человека, служит для диагностики различных заболеваний, в особенности болезней эндокринной системы, нарушений терморегуляции, белкового, углеводного и жирового обмена и др. Следует сказать, что в современных учебниках по физиологии, патофизиологии и биологии вопрос об энергообмене человека и животных рассматривается недостаточно подробно. Обычно он занимает только 2–2,5% содержания. Между тем в последние время появились новые проблемы энергообмена, которые раньше почти никогда не выдвигались. Это, например, причины и механизмы высокого потребления энергии в условиях основного обмена, значение в физиологии коэффициента полезного действия организма человека, неизвестные ранее особые процессы теплообмена организма со средой, физиологические и социальные составляющие энергообмена человека. Существует также вопрос о теоретической возможности жизни без энергии.

Ключевые слова: энергообмен у человека, теплообмен у человека, коэффициент полезного действия организма, жизнь без энергии.

56

Энергообмен — центральная и наиболее общая проблема жизни и, следовательно, современной физиологии, биологии и медицины. Он играет главную роль на всех этапах зарождения и развития жизни. Все функции организма — от деятельности мозга до роста ногтей и волос — зависят от наличия и потребления энергии. К сожалению, в настоящее время интерес к теоретическим и практическим проблемам энергообмена снизился. В старых и новейших учебниках по физиологии и патофизиологии энергообмену обычно отводится 2–2,5% содержания. В оглавлениях некоторых учебников физиологии вопросам обмена веществ и энергии вообще не находится места. Таков, например, учебник фундаментальной физиологии объемом 1050 страниц, выпущенный в свет издательством «Академия» в 2004 г. [1]. Между тем процесс энергообмена в медицинских исследованиях должен занимать существенное место, поскольку уровень энергообмена определяет физиологическое состояние организма и является важным критерием здоровья. Снижение или повышение уровня энергообмена важно в диагностике различных болезней, для определения изменений в обмене веществ ор-

ганизма, для наблюдения за развитием физиологической адаптации к различным факторам среды (низкая или высокая температура, недостаточность питания, усиленная мышечная нагрузка и т.д.). Благодаря естественному пути развития науки появились новые, никогда ранее не выдвигавшиеся задачи в изучении энергообмена. Интересно, что ряд важных вопросов, которые, казалось бы, всегда были на виду, просто игнорировались специалистами в течение длительного времени.

Для современного врача расширение знаний по энергообмену крайне необходимо, поскольку энергетика в настоящее время быстро развивается. Данная статья посвящена проблемам энергетики живого организма.

Первая проблема. В условиях основного обмена человек затрачивает примерно 1800 килокалорий (ккал) в сутки. Возникает вопрос, на какую работу затрачивается эта энергия, если человек находится в полном физическом и умственном покое, натошак, при комфортной температуре среды. Полагали, что энергорасходы на дыхание, деятельность сердца, непрерывную деятельность почек вполне объясняют эту затрату. Однако это оказалось

K.P. Ivanov

I.P. Pavlov Institute of Physiology of RAS, St. Petersburg, Russian Federation

Modern Medical Problems of Energy Exchange in Humans

In a living organism 72% of energy exchange occur in the visceral organs, which comprise only 5–6% of the total body mass. The remaining energy is spent at the expense of the skin, bones, connective tissues, resting muscles. The level of energy expenditure determines the general physiological state of a human organism, serves for the diagnostics of various diseases, in particular, the diseases of endocrine system, the disruptions of thermoregulation, protein, carbohydrate, and lipometabolism, etc. It should be mentioned that in modern textbooks of physiology, pathophysiology, and biology the problem of energy exchange in humans and animals is given inadequate consideration. Traditionally it occupies only 2–2.5% of the content. Meanwhile, new problems of energy exchange have appeared recently, which almost never were advanced earlier. These are, for example, the reasons and mechanisms of high energy expenditure under conditions of metabolism, the significance of the coefficient of efficiency of a human organism in physiology, special processes previously unknown of the organism heat exchange with the environment, physiological and social components of human energy exchange. There is also a problem of a theoretical possibility of life without energy.

Key words: energy exchange in humans, heat exchange in humans, coefficient of efficiency of an organism, life without energy.

совсем не так. В условиях основного обмена на дыхание, деятельность сердца и работу почек затрачивается всего 22–23% энергетического бюджета организма человека. Это составит всего порядка 405 ккал из 1800 [2]. На какую работу затрачивается 1400 ккал? Интересно, что за всю эпоху физиологических исследований такой вопрос почти никогда не возникал, но теперь он оказался одним из центральных вопросов обмена веществ в живом организме. Анализ этого явления следует начать с того факта, что ткани всех живых организмов в силу законов термодинамики постоянно разрушаются и обновляются. Как разрушение отслуживших свой срок молекул, так и создание новых требует энергии. Современная наука очень хорошо изучила синтез белка [3]. Это самый «дорогой» энергетический процесс в организме. При разрушении каждой пептидной связи освобождается примерно 5 ккал на 1 моль белка. Однако синтез этой связи «стоит примерно» 30 ккал/моль. Коэффициент полезной деятельности (КПД) этой работы равен, таким образом, только 16%. Считается, что в организме взрослого человека ежедневно распадается и заменяется около 400 г белка [3]. Однако энергетический расход подсчитать очень трудно, т.к. часть молекул многократно обновляется, а часть синтезируется вновь. Кроме того, при синтезе белка образуется много соединений, на которые затрачивается много ккал энергии. Это минимум 20 активирующих ферментов, 70 рибосомных белков, 4 рибосомных РНК, не менее 20 транспортных РНК и не менее 10 вспомогательных ферментов. Вся эта дополнительная масса реагентов образуется только для нескольких эпизодов синтеза, после чего они необходимы вновь. Лучше всего судить о непрерывном синтезе белка и других продуктов обмена можно по фактическим данным. Например, мы знаем, что полубоношение печени человека происходит в течение 5–6 сут. Если печень весит 1,5 кг, это означает, что каждый день полубоношается 300 г вещества печени (у мыши полубоношение печени происходит в течение 1–1,5 сут). По данным Nohachka H.W., Somero G.N. [4], 52% энергетического «бюджета» печени идет на синтез и обновление белка. На синтез углеводов расходуется примерно 17% запасов энергии печени, важнейшая функция печени — синтез мочевины — потребляет только 3% энергии.

В мозге человека обновление белков также происходит очень интенсивно [5] и не уступает по темпам этому процессу в печени. Мозг потребляет 16–18% всего энергетического «бюджета» организма человека. Эта энергия идет на поддержание электрических потенциалов в клетках мозга, но в основном на обновление и замену белковых молекул. Потребление энергии совершенно одинаково при полном умственном покое, во время сна и при напряженной умственной работе. Мозг в данном случае сравним с вычислительной машиной, в которой вся энергия тратится на поддержание анодного напряжения (в мозге — на обмен белка), сама же по себе вычислительная операция в вычислительной машине почти не использует энергию, так же как и в мозге, интеллектуальная деятельность которого практически не сопровождается энергозатратами. Сама по себе ткань мозга очень чувствительна к недостатку энергии. Уменьшение потребления кислорода на 15–20% ведет к тяжелым нарушениям функций мозга [6].

Интересно, что сердце потребляет достаточно много энергии: примерно 10,7% общего «бюджета» организма. Принято считать, что сокращения миокарда — главная причина высоких энергетических затрат. Однако известно, что остановленное несокращающееся сердце

продолжает потреблять от 20 до 30% энергии былого сердца [7]. Можно полагать, что этот расход составляет «основной обмен» сердца и потребляется для восстановления и обновления белковых структур. Следует отметить, что и в других органах имеются признаки быстрого обновления белков. Их оценивают по продолжительности жизни клеток. Так, например, для клеток слизистой оболочки желудка она составляет 1,8; тонкой кишки — 1,3; печени — 10; толстой кишки — 10; прямой кишки — 5; заднего прохода — 4; кожного эпителия — 5–6 сут. Эритроциты живут 100–120 сут, лейкоциты — 1–2 сут и т.д.

Итак, согласно законам термодинамики, живой организм — это тело с динамически обновляемым составом. Основой этого обновления служат белки. От рождения до смерти организм обновляется многократно. Динамическое обновление состава тела «стоит» энергетически очень дорого. Вот почему даже при полном покое и видимой бездеятельности затрачивается много энергии. Если подсчитать энергию, которую тратит человечество на поддержание жизни в течение года, то она оказывается равна или превышает количество электроэнергетики, которая вырабатывается всеми электростанциями современного мира за этот же период времени [7], и это не абстракция, а современный взгляд на жизнь и физиологию живого организма. Мы полагаем, что каждый врач и студент медицинского или общебиологического вуза должен знать этот важнейший закон живого мира.

Вторая проблема касается особой роли аденозинтрифосфорной кислоты (АТФ) в каждом живом организме, в т.ч. человеческом. Дело в том, что почти весь поток энергии в живом в организме человека проходит через АТФ, поскольку только энергия, выделяющаяся при гидролизе АТФ, является свободной, способной производить физиологическую работу и участвовать в синтезе других макроэргов. На этом основании можно заключить, что почти вся энергия основного обмена человека в количестве 1800 ккал идет на синтез АТФ с помощью фермента АТФ-синтазы. Она используется для синтеза различных соединений в организме, необходимых для его жизнедеятельности, транспорта ионов против градиента их концентрации в клетке и межклеточной среде, сокращения мышц, восстановления клеточных популяций и т.д.

Факт того, что весь поток энергии идет только через один носитель, представляет особую важность. Это позволяет накапливать энергию в клетке за счет только одного носителя и наиболее эффективным способом регулировать ее расход. Однако синтез АТФ сопровождается рядом проблем, которые только недавно были открыты и изучены. Во-первых, работа синтеза АТФ имеет КПД всего лишь 40% [3]. Это означает, что из 1800 ккал всего 720 предоставляют организму свободную энергию, способную производить физиологическую работу. Остальные 60% составляет связанная энергия, которая никакой работы производить не может. Во-вторых, важнейшей особенностью АТФ является очень малая ее энергоемкость. При гидролизе 1 моля АТФ на АДФ и фосфор высвобождается только 10 ккал/моль. Следовательно, чтобы обеспечить организм человека энергией в течение 1 сут, необходимо синтезировать 72 энергополноценных моля АТФ. Но каждый моль имеет массу 506 г. В таком случае в сутки требуется синтезировать:

$$0,506 \text{ г} \times 72 = 36 \text{ 432 г АТФ}$$

Интересно, что воспроизведение массы АТФ никогда не рассчитывалось. Мы впервые сделали такой расчет

в 1972 г. и показали, что воспроизводство массы АТФ в сутки составляет 36 кг для человека, т.е. более 1/2 массы его тела. Если же обратиться к сравнительной физиологии, можно получить совершенно фантастические числа. К примеру, у кролика масса синтезированной за 1 сут АТФ будет примерно равна массе животного, у крысы она будет превышать массу тела в 2 раза, у карликовой мыши — в 10–12 раз. Все говорит о том, что с количественной стороны мы пока еще плохо знаем «цену» жизни. Очевидно, что с медицинской точки зрения такие знания врачу очень важны, поскольку они позволяют количественно оценивать те энергетические процессы, которые необходимы для жизни и здоровья.

Однако необходимо отметить, что указанные 720 ккал используются тканями не полностью. Работа по использованию энергии АТФ тоже имеет КПД, который равен примерно 50% [8]. В таком случае только 360 ккал, т.е. 1/2 общей энергии, потребляемой человеком, действительно затрачивается на возобновление разрушающихся молекул, на поддержание нормального состава клеток и на работу сердца, почек и легких, функционирование которых необходимо для выполнения этой работы на уровне основного обмена. Это очень важный факт в общей энергетике живого организма. К сожалению, он не упоминается в учебниках по физиологии, о нем не знают студенты, а часто — и их преподаватели. Факт заключается в том, что КПД организма, если считать, что энергетические затраты человека в сутки составляют 1800 ккал, сравнительно низок и составляет всего 15–18%.

Третья проблема. Какое количество энергии потребляет один человек при своей физиологической и социальной деятельности? Лица, занимающиеся интеллектуальным трудом, в течение суток научной или административной деятельности расходуют порядка 2500 ккал. Примерно 700 ккал идет на двигательную активность, остальные 1800 — это расходы на основной обмен, т.е. на дыхание, деятельность сердца, печени, потребление энергии мозгом и другими органами, а также расходы на восстановление постоянно разрушающихся живых структур. Однако нужно учесть, что каждая калория, которую человек получает с пищей сельскохозяйственного производства, «стоит» 10 кал расхода энергии [9]. Следовательно, жизнь человека будет «стоять» в 10 раз больше и составит 25 000 ккал/сут. Хотя это, конечно, внешняя энергия, но она входит в энергетическую ценность пищи, потребляется человеком и, следовательно, увеличивает его энергетический баланс. Но человек для нормальной жизни нуждается в крыше над головой, одежде, отоплении и освещении своего жилища, горячей воде, транспорте и ряде других житейски необходимых вещей и услуг. Американский экономист Odum [9] полагает, что расходы этой внешней энергии, необходимой для нормальной жизни человека, увеличивают его энергетический баланс еще в 10 раз. В таком случае человек будет «обходиться» природе и промышленности в 250 000 ккал, или 290 кВт-часов/сут. Это очень большая энергия. Для сравнения, к примеру, в московском метро в 8 вагонах электропоезда в часы пик стоят, сидят или двигаются от входа к выходу около 2500 пассажиров, каждый из которых имеет мощность в среднем около 160 Вт [10]. Это означает, что все пассажиры в сумме отдают мощность 400 кВт. Эта энергия близка к количеству таковой, потребляемой электромоторами, находящимися на осях вагонов и приводящими поезд метро в движение.

Четвертая проблема. В учебниках по физиологии указано, что количество потребляемой энергии в калориях в единицу времени должно быть равно количеству энер-

гии в калориях, которое организм отдает в среду за то же время — только тогда температура тела может поддерживаться на постоянном уровне. Следовательно, человек отдает в среду столько же энергии, сколько он ее получает. Возникает вопрос: если человек отдает всю полученную энергию, то за счет какой энергии он поддерживает свою жизнь? Интересно, что этот вопрос игнорировался в течение практически 2 веков от момента определения энергозатрат живым организмом, сделанного еще Лавуазье, и до нашего времени. Во всяком случае, каких-либо внятных объяснений этой загадки не имеется ни в старых, ни в новых учебниках по физиологии или в специальных работах по проблемам обмена энергии в живом организме. Первым биологом, который впервые в 1982 г. с большой осторожностью высказался об этой проблеме, был А. Ленинджер [3]. Он писал, что организм потребляет для физиологической работы свободную энергию, но затем возвращает ее в среду в менее пригодной для ее использования форме. Теперь известны основные черты этой проблемы. Как уже отмечалось, вся энергия, потребляемая организмом, проходит через синтез АТФ. КПД физиологической работы этого синтеза составляет примерно 40%. На этом основании составлены расчеты качества получаемой живым организмом энергии и энергии, отдаваемой в среду. Если придерживаться классических законов термодинамики, то общий баланс энергии какой либо системы или тела записывается так:

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S,$$

где ΔH — общее количество энергии, ΔG — свободная энергия, т.е. энергия, которая может быть использована для производства работы; $T\Delta S$ — связанная энергия, представляющая собой тепло и для производства работы не использующаяся.

Организм получает из пищи энергию, в которой, согласно подсчетам КПД, имеется 40% свободной и 60% связанной энергии. Тогда общий баланс энергии приблизительно можно записать так:

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S$$

$$40\% \quad 60\%$$

После энергетических преобразований и использования свободной энергии ΔG для различной физиологической работы в организме обозначение энергии, которую организм отдает в среду, приобретает примерно следующий вид:

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S$$

$$\approx 3\% \quad \approx 97\%$$

Проценты имеют формальное значение. Они лишь отражают уменьшение свободной и увеличение связанной энергии, но ничего не говорят о количестве свободной и связанной энергии. Тем не менее совершенно ясно, что после использования свободной энергии в среду будет отдаваться в определенной мере обесцененная энергия, лишенная какой-то части энергетического потенциала.

Итак, организм живет за счет свободной энергии, которую он растрчивает на различного рода физиологическую работу [9]. Свободная энергия выполняет определенную работу и превращается в тепло, и калории пищи, сохраняя свой тепловой эквивалент, теряют часть своего энергетического потенциала. Свободная энергия превращается в связанную. Это явление называют изменением качества энергии [9]. Данные отношения хо-

рошо объяснены в учебнике В.О. Самойлова [11]. Таким образом, можно сказать, что организм получает с пищей полноценную энергию с большим энергетическим потенциалом, а отдает энергию, в определенной степени лишенную части энергетического потенциала. При этом тепловая идентичность между различными калориями остается, но существуют различия в энергетическом потенциале. Так исчезает загадочное равенство между полученной организмом энергией с пищей и энергией, отдаваемой им в окружающую среду. Понятие «качество энергии», с точки зрения биологии и физиологии, представляет собой энергетический эксцесс: это явление практически никогда в живом организме не рассматривалось, но в промышленной энергетике оно чрезвычайно популярно. Подсчитано, что 1 кал солнечного излучения по энергетическому потенциалу равна энергии 0,0005 кал от сжигания каменного угля; 100 кал растительного дextrита (зеленой массы) равно энергетически 0,05 кал от сжигания каменного угля [9]; 8000 кал солнечного излучения равно 4 кал от сжигания полезных ископаемых.

Эти числа совершенно не знакомы биологам, физиологам и врачам, тогда как такие особенности энергетике необходимо разъяснять в справочной литературе. Необходимо, чтобы в учебниках и лекциях эти числа были проиллюстрированы. Тогда студенты и преподаватели будут представлять отношения между свободной и связанной энергией согласно современным понятиям.

Пятая проблема. Жизнь без энергии — еще одна особенность энергообмена. Она не имеет прямого практического отношения к физиологии человека, но несет колоссальное значение для всего живого мира — от микроорганизмов до низших позвоночных и даже некоторых млекопитающих.

Известно, что живая ткань, лишенная притока энергии, разрушается и погибает либо от некроза, либо от апоптоза. Так происходит при инфаркте миокарда, инсульте, гангрене конечностей. Как уже упоминалось выше, обновление состава тканей организма — важнейшая биологическая функция живого организма. Но возможна ли жизнь без этого обновления и притока энергии? Холод резко снижает обмен веществ и практически исключает разрушение и восстановление клеточного состава тканей. При температуре -100–130 °С можно законсервировать и сохранить жизнеспособность организма на неопре-

деленное время, если будет найден способ его «разогревания» без повреждения тканей. Однако дело в том, что и при температуре выше нуля некоторые организмы способны полностью или частично «отключать» нормальный энергообмен и при этом сохранять жизнеспособность. Так, например, микроорганизмы, обитающие в земной коре на глубине 2–3 км от поверхности земли почти при полном отсутствии кислорода и питательных веществ, при сравнительно высокой температуре могут сохранять жизнеспособность, почти полностью «отключая» обмен веществ. Они делятся только раз в 100 лет. За это время перед делением они накапливают энергетический потенциал, до деления энергопотенциал не расходуется [12, 13]. Многие насекомые, такие как муха, при температуре выше нуля также «отключают» свой обмен и существуют несколько месяцев практически без него.

Подобным свойством обладают даже некоторые позвоночные. Африканская двоякодышащая рыба протоптер в период засухи зарывается в ил и полностью прекращает энергообмен на время от 1 года до 5 и даже, по некоторым сведениям, до 10 лет [4], и при этом она сохраняет запасы углеводов и жизнеспособность. У этих рыб во время спячки не нарушается даже азотистый обмен. Некоторые млекопитающие способны в течение определенного периода резко уменьшать приток энергии и сохранять жизнеспособность. Тюлень Уэдделла способен 1 ч 20 мин проводить под водой без дыхания. Оказывается, он может в 2–3 раза сократить энергообмен [4]. Для человека такие случаи неизвестны. Однако механизмы безопасных для жизни «отключений» энергообмена с научной и практической точки зрения чрезвычайно интересны. Эти явления активно изучаются, хотя механизм «выключения» обмена с сохранением определенных запасов питательных веществ и поддержание жизнеспособности все еще остается загадкой.

Каждая наука тяготеет к развитию. В нашей статье немного ссылок, что связано с тем, что существует крайне мало работ по тем направлениям биологии и физиологии человека и животных, которые мы обсуждали и пытались выяснить их сущность. Мы рассмотрели, конечно, не все стратегически важные аспекты энергообмена, однако надеемся, что представленный небольшой материал все же позволит подняться на 1–2 ступени для лучшего понимания жизни и энергетике живого организма.

REFERENCES

1. Fundamental'naya klinicheskaya fiziologiya. Uchebnik [Fundamental clinical physiology. Textbook]. Pod red. A.V. Komkova [A.V. Komkov (editor)]. Moscow: Akademiya. 2004. 1050 p.
2. Schmidt-Nielsen K. Animal physiology. Cambridge.: Cambridge Univ. Press. 1972. 400 p.
3. Lehninger A. Principles of biochemistry. New York: Worth Publishers INC. 2008. 1263 p.
4. Hochachka H.W., Somero G.N. Biochemical adaptation. New York, Oxford.: Oxford. Univ. Press. 2002. 460 p.
5. Palladin A.V., Belik Ya.I., Polyakova N.M. Belki golovnogo mozga i ikh obmen [Protein metabolism of the brain]. Kiev: Naukova dumka. 1972. 310 p.
6. Ivanov K.P. Osnovy energetiki organizma. T. 2. Biologicheskoe okislenie [Fundamentals of the body's energy. Volume 2. Biological oxidation]. St. Petersburg: Nauka. 1993. 280 p.
7. Ivanov K.P. Osnovy energetiki organizma. T. 5. Energetika zhivogo mira [Fundamentals of the body's energy. Volume 5. Energetics of the living world]. 2007. 250 p.
8. Alyukhin Yu.S., Ivanov K.P. Sootnoshenie mezhdu rabotoi i raskhodom energii v izolirovannoi myshitse mlekopitayushchego. T. 282 [Correlation between work and energy expenditure in isolated mammalian muscle]. DAN SSSR. 1984. 983–987 pp.
9. Odum E.P. Basic ecology. Vol. 1. Philadelphia. 1983. 320 p.
10. Fanger P.O. Thermal comfort. Copenhagen. Danish Technical press. 1970. 250 p.
11. Samoilov V.O. Meditsinskaya biofizika [Medical biophysics]. St. Petersburg: Spets. lit. 2004. 500 p.
12. Ehrlich N.L. Geomicrobiology. Marsel: Dekker. 1996. 530 p.
13. Fredrickson J.K., Onstott T.S. Microbes deep inside the earth. Nature. 1996; 275 (4): 42–47.

FOR CORRESPONDENCE

Ivanov Kirill Pavlovich, PhD, Professor, Head of the Laboratory of bioenergetics and thermoregulation, Pavlov Institute of Physiology RAS, Honored Worker of Science of RF
Address: 199034, St. Petersburg, Makarov Embankment, 6; **tel.:** (812) 293-76-80; **e-mail:** kpivanov@nc2490.spb.edu