

УДК 612.591

В. А. Максимович

ФИЗИОЛОГИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ЧЕЛОВЕКА К ЭРГОТЕРМИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

Физиологическая устойчивость организма обеспечивает сохранение жизни и здоровья человека в неблагоприятных условиях внешней среды. Изучение характеристики, информативных показателей, механизмов и закономерностей ее изменений необходимо для прогноза и управления функциональным состоянием организма. В статье рассматриваются показатели так называемой тепловой устойчивости, т. е. физиологической устойчивости человека к эрготермическим воздействиям, представляющим собой сочетание физической работы и высокой температуры среды.

Методика исследований

Исследования проведены с участием 150 неадаптированных к теплу мужчин в возрасте 20—30 лет. В климатической камере при температуре 40 °С и 85 % относительной влажности воздуха обследуемые выполняли физическую работу мощностью 61 Вт. У них регистрировали термо-, спиро-, кардиодинамику и интервалы рассогласования рабочих движений с задающим сигналом [6], дыхательный газообмен по Холдену [10], электросопротивление кожи [9], терморезистентность эритроцитов [3, 8], уровень холестерина в крови [2], объем кровотока [4].

При обработке результатов исследований применяли общепринятые статистические методы, а также подбирали эмпирические уравнения [7].

Результаты исследований и их обсуждение

При эрготермическом воздействии у обследуемых существенно различалась средняя скорость повышения ректальной температуры, имея диапазон $3 \cdot 10^{-4} - 6,3 \cdot 10^{-4}$ °С/с. Судя по этим величинам, способность сопротивляться нарушению термического гомеостаза (термогомеостатичность) может быть у одного человека вдвое меньшей, чем у другого.

Неодинаковой у обследуемых была и предельная термоадекватность, т. е. предельно переносимая гипертермия. Ее определяли по экстремальным величинам кривой динамики ректальной температуры [5]. В среднем для всей группы обследованных предельный прирост ректальной температуры составил 1,4 °С при $\sigma = 0,2$ °С, но были и такие лица, у которых переносимая гипертермия не превышала 0,8 °С.

Интегрально физиологическая устойчивость может быть оценена по времени переносимости эрготермического воздействия. Это время (τ) определяется из отношения предельной гипертермии (δ_m) к скорости ее нарастания (v): $\tau = \frac{\delta_m}{v}$.

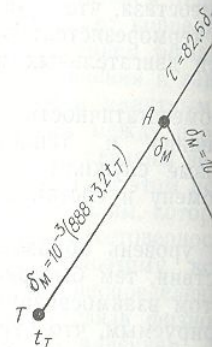
Продолжение воздействия сверх этого времени может привести к недопустимому перегреванию организма со всеми вытекающими отсюда последствиями вплоть до гибели.

Исследования показали, что физиологическая устойчивость организма, характеризующая его способность выжить при эрготермическом воздействии, не была одинаковой. Время переносимости заданных условий колебалось от 35 до 100 мин, т. е. различалось почти в три раза.

Возникал вопрос о физиологических механизмах, определяющих различия в устойчивости обследуемых к эрготермическим воздействиям.

Для этого был проведен анализ функциональных показателей.

Вершиной схемы устойчивости к эрготермическим воздействиям является время выживания. Оно зависит от предельной те



Функциональна

Звенья: у — физиологическая устойчивость; Т — теплоустойчивость; Х — химизм обмена; К — обмен тканей; К — обмен

Показатели: τ — время выживания, мин; δ_m — предельная гипертермия, °С; t_T — время терморезистентности, мин; q — энерготраты, Вт; d — теплоприход, Вт; λ — электросопротивление, Ом

низма и определяется э предельной гипертермией

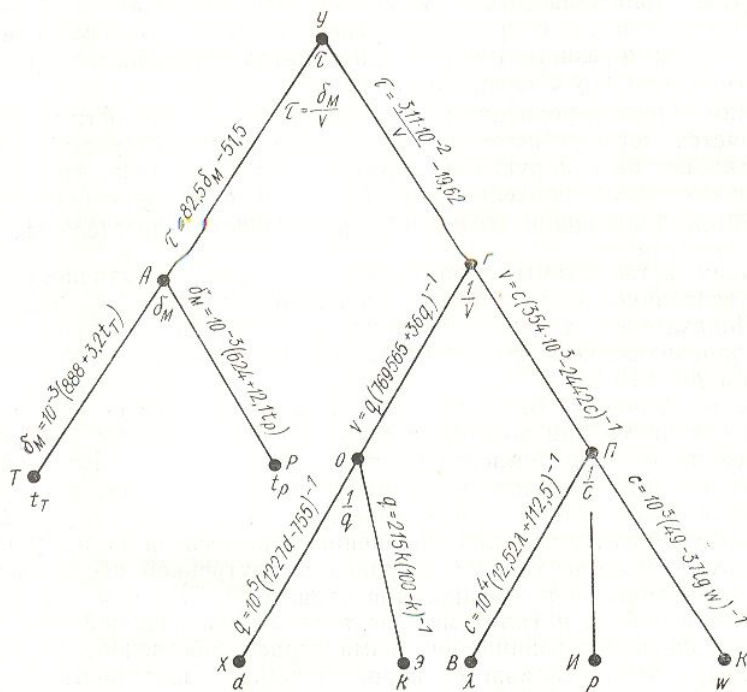
При этом от величины зависит линейно, а от с

Из схемы видно, что статичность зависит от предельную термоадекватность и устойчивости процессов на термогемостатичность организме и теплообмена

В качестве показателя терморезистентность эритроцитов, по-видимому, лучшими тканевых элементов к соматическим, в частности характер

Для этого был проведен анализ и построена схема последовательной связи ее функциональных звеньев и соответствующих им физиологических показателей.

Вершиной схемы (см. рисунок) служит физиологическая устойчивость к эрготермическим воздействиям и ее интегральный показатель — время выживания. Как уже говорилось, тепловая устойчивость зависит от предельной термоадекватности и термостатичности орга-



Функциональная структура тепловой устойчивости человека

Звенья: У — физиологическая устойчивость; А — предельная термоадекватность; Г — термостатичность; Т — теплоустойчивость тканей; Р — теплоустойчивость регулирования; О — теплообразование; Х — химизм обмена; Э — экономность реакций; П — перенос тепла; В — теплопроводность тканей; К — объем кровотока; И — испарительный теплообмен.

Показатели: t — время выживания, мин; δ_m — предельная гипертермия, °C; v — скорость гипертермии, °C/с; t_r — время терморезистентности эритроцитов, с; t_p — время сохранения ритмичности реакций, мин; q — энерготраты, Вт; d — дыхательный коэффициент, ед; k — аритмичность движений, сс; теплоприход, Вт; λ — электросопротивление кожи, кОм; w — минутный объем крови, л/мин; p — влагопотери испарением, г/с.

низма и определяется зависимостью времени выживания от величины предельной гипертермии и скорости ее наступления.

При этом от величины предельной гипертермии время выживания зависит линейно, а от скорости ее наступления — гиперболически.

Из схемы видно, что предельная термоадекватность и термостатичность зависят от различных свойств организма. Так, на предельную термоадекватность влияют величины терморезистентности тканей и устойчивости процессов регулирования физиологических функций, а на термостатичность — величины собственного теплообразования в организме и теплообмена с внешней средой.

В качестве показателя устойчивости тканей к нагреванию изучали терморезистентность эритроцитов, которые в своем непрерывном движении, по-видимому, лучше всего могут отразить приспособленность тканевых элементов к совокупности условий внутренней среды организма, в частности характер отношений с тепловыми условиями. Действи-

тельно, исследования показали, что у обследованных коэффициент корреляционного отношения между величинами предельной гипертермии организма и терморезистентностью эритроцитов достигал 0,83.

Показателем устойчивости регуляторных процессов служило время от начала эрготермического воздействия до момента, когда вдвое и больше изменялись интервалы рассогласования рабочих движений с задающим сигналом, стандартная колеблемость ритма сердечных сокращений или отношения дыхательных фаз. Этот показатель достоверно ($r=0,7$) коррелирует с предельной гипертермией организма и в совокупности с терморезистентностью эритроцитов обеспечивает предсказуемость ее величины у обследуемых.

Таким образом, величина предельной термоадекватности у человека определяется терморезистентностью тканей и устойчивостью регуляторных процессов к нарушению термического гомеостаза, что проявляется взаимосвязью предельной гипертермии с терморезистентностью эритроцитов и временем сохранения ритмичности двигательных и вегетативных реакций.

Другая ветвь схемы характеризует термогомеостатичность организма, связанную с процессами теплообразования и теплопереноса. Показателем теплообразования в организме служили энерготраты, определявшиеся по дыхательному газообмену и составлявшие в среднем 298 ± 18 Вт.

Как и следовало ожидать, чем выше был уровень образования тепла в организме при эрготермическом воздействии, тем быстрее повышалась внутренняя температура тела. При этом взаимосвязанными между собой были показатели, обратные регистрируемому, что отражается видом соответствующего уравнения, представленного на схеме.

Следует сказать, что вид уравнений взаимосвязи более устойчив в широком диапазоне условий внешней и внутренней среды, чем величины корреляции и коэффициентов уравнений. Так, чем интенсивнее выполняемая работа и (или) меньше температура внешней среды, тем большую роль в нагревании организма играет собственное теплообразование. При этом усиливается корреляционная зависимость скорости гипертермии от уровня теплообразования в организме и ослабляется — от внешнего потока тепла. Наоборот, при повышении температуры внешней среды и (или) снижении физической нагрузки возрастает относительное значение теплоприхода извне и повышается его корреляция со скоростью нарушения термического гомеостаза. Вид же уравнений остается неизменным, подтверждая качественное, а не количественное проявление взаимосвязи и дополняя корреляционный анализ.

Таким образом, функциональная организация физиологических механизмов, обеспечивающих термический гомеостаз, зависит от внешних условий, в которых находится организм, и внутренней его активности. Усиление или ослабление функциональных связей отражается в изменении величин корреляции между соответствующими показателями, а их характер — вида эмпирических уравнений.

Индивидуальные различия уровней энерготрат организма обусловлены особенностями проявления многообразных физиологических и биохимических реакций. Среди них обобщенно можно выделить две: экономность расходования энергии на двигательные акты и характер обмена веществ, главным образом степень участия в нем жиров как наиболее энергоемкого продукта. Об экономности, скоординированности движений судили по аритмичности двигательных реакций в стабильном режиме работы, а о характере обменных процессов — по дыхательному коэффициенту.

Исследования показали, что величина энерготрат достоверно коррелировала ($r=0,5-0,6$) с этими показателями. При этом гармонические показатели аритмичности рабочих движений и энерготрат нахо-

дились в прямой, а обратной зависимости.

При неизменном поступлении тепла из момента. С одной с структур оболочки роны — от величины крови, конвекционные ренным органам.

Как оказалось, чины минутного обт чия (диапазон 6—1 междуточное звено ным показателем т (коэффициент коррелюнакоплением быского уравнения к э организм и минутн отношений между п жду собой связаны казатели. При этом ще показателям, кот тистикой. Достоверн меняется. Поэтому оставляет неопредел Характер связи физ сания ее уравнением

Из-за отсутствия ней тела человека в затели. Принимая в никами тепла, измер думых. В определе далась небольшая о теплоступления в случайная колеблем

Хорошим провод лопроводности в 200 ли, что если существе поверхности тела чел обязательно проявит ности поверхности т увлажненности. О ве лению кожи (ЭСК), показали, что чем в ступало в организм. и отражал, по-видим ведение тепла через перенос с током кров

На схеме не за с влаготериями орга при высокой влажно ча за счет испарени на теплообмен органи

При низких уро способствует замедле тельного теплообмена

Как в том, так и связь теплопроводнос могомеостатичностью

дились в прямой, а дыхательный коэффициент и энерготраты — в обратной зависимости.

При неизменных параметрах эрготермического воздействия на поступление тепла извне к сердцевине тела человека могут влиять два момента. С одной стороны, поток тепла зависит от теплопроводности структур оболочки тела, а с другой, количественно более важной стороны — от величины кровообращения, фактически минутного объема крови, конвекционно переносящей тепло от поверхности тела к внутренним органам.

Как оказалось, при указанном эрготермическом воздействии величины минутного объема крови имели заметные индивидуальные различия (диапазон 6—11 л/мин). При этом если опосредованная через промежуточное звено взаимосвязь минутного объема крови с интегральным показателем тепловой устойчивости была ограниченно выражена (коэффициент корреляции около 0,3), то непосредственная связь с теплонакоплением была почти вдвое большей. При подборе эмпирического уравнения к зависимости между величиной поступления тепла в организм и минутным объемом крови был выявлен характер взаимоотношений между переменными. На схеме видно, что фактически между собой связаны не регистрируемые, а обратные регистрируемым показатели. При этом показатели МОК прологарифмированы, что присуще показателям, которые характеризуются средней геометрической статистикой. Достоверность корреляционной связи, конечно, от этого не меняется. Поэтому корреляция, вскрывая количественную сторону, оставляет неопределенной качественную природу взаимосвязи явлений. Характер связи физиологических показателей раскрывается при описании ее уравнением.

Из-за отсутствия прямого способа измерения теплопроводности тканей тела человека были использованы некоторые косвенные ее показатели. Принимая во внимание, что жиры являются плохими проводниками тепла, измеряли среднюю толщину жировой складки у обследуемых. В определенном диапазоне ее величин (0,54—1,08 см) наблюдалась небольшая отрицательная (до $-0,3$) корреляция со скоростью теплопоступления в организм. Однако за пределами этого диапазона случайная колеблемость возрастала либо менялся знак корреляции.

Хорошим проводником тепла является вода. Ее коэффициент теплопроводности в 200 раз больше, чем у воздуха. Поэтому предполагали, что если существует взаимосвязь между теплопроводностью тканей поверхности тела человека и скоростью его нагревания, то она должна обязательно проявиться при столь сильных изменениях теплопроводности поверхности тела, какие происходят при различной степени ее увлажненности. О величине увлажненности судили по электросопротивлению кожи (ЭСК), которое составляло 0,1—5,6 кОм. Исследования показали, что чем выше увлажненность кожи, тем больше тепла поступало в организм. Коэффициент корреляции не был большим ($r=0,4$) и отражал, по-видимому, тот факт, что в перегревании организма проведение тепла через ткани играет значительно меньшую роль, чем его перенос с током крови.

На схеме не заполнена уравнением связь величин теплопереноса с влаготермиками организма. Дело в том, что исследования проводились при высокой влажности воздуха, когда не была возможна теплоотдача за счет испарения пота. Поэтому потоотделение не могло влиять на теплообмен организма.

При низких уровнях влажности воздуха потоотделение, наоборот, способствует замедлению перегревания вследствие улучшения испарительного теплообмена.

Как в том, так и в другом случае проявляется некоторая взаимосвязь теплопроводности поверхностного слоя тела человека с его термостатичностью. Поэтому такой показатель, как ЭСК, несет

определенную информацию о способности организма сопротивляться перегреванию, хотя истолкование полезности его сдвигов противоположно при высоких и низких уровнях влажности воздуха. Впрочем, величина минутного объема крови, имеющая для процесса теплопереноса несомненно первенствующее значение, также неоднозначно связана со скоростью гипертермии в условиях различной влажности воздуха. При низком уровне влажности и повышенной температуре увеличение минутного объема крови способствует отводу тепла от сердцевины тела к границе с внешней средой. Наоборот, при высоких уровнях температуры и влажности увеличение минутного объема крови способствует поступлению тепла в организм и ускоряет перегревание.

Таким образом, взаимосвязь физиологических показателей, определяющих движение тепла в организме человека, с показателями его термостатичности неодинакова для условий сухой и влажной жары, и поэтому прагматическая оценка их изменений должна быть различной.

Обобщая сказанное, можно прийти к заключению, что для выявления функциональных взаимосвязей в организме полезной оказывается комплексное применение физиологических и математических методов анализа. Величина корреляции дает представление о силе зависимости физиологических компонентов, а ее знак и вид эмпирического уравнения качественно характеризуют их взаимоотношение. В то же время для построения причинно-следственной цепочки необходим физиологический подход. Как было показано, даже при непосредственной взаимосвязи скорости гипертермии с уровнем энерготрат величина их корреляции может быть очень малой при определенных условиях внешней среды и внутренней активности организма. Опираясь на такой математический факт и игнорируя физиологическую сторону явлений, можно было бы прийти к неверному выводу об отсутствии непосредственной связи между ними. Лишь с помощью физиологического анализа удается понять непостоянство тесной корреляционной связи.

С другой стороны, математический анализ позволяет раскрыть некоторые дополнительные естественные стороны явления. Так, именно этим путем удалось установить, что связанными между собой являются не регистрируемые скорость теплопереноса и минутный объем крови, а обратные им показатели. Подобную закономерность трудно обнаружить традиционными физиологическими методами без сопоставления различных средних величин (арифметических, геометрических, гармонических), что входит в алгоритм подбора эмпирических уравнений.

Следовательно, именно сочетание физиологических и математических методов позволяет проанализировать и в первом приближении упорядочить иерархию функциональных характеристик физиологической устойчивости организма человека к эрготермическим воздействиям. При этом обращает на себя внимание, что механизмы, определяющие термостатичность, изучены довольно глубоко вплоть до биохимического уровня.

Этого не скажешь о предельной термоадаптивности. Как видно из схемы, на вопрос о том чем определяется различная устойчивость тканей [1] и тем более процессов регулирования к нагреванию, однозначных ответов еще нет. По-видимому, это объясняется тем, что само понятие, определение и методы измерения предельной астабильности организма появились не так давно, а гомеостатичность изучается более ста лет.

Выводы

1. Физиологическая устойчивость человека к эрготермическим воздействиям проявляется в его способности сохранить свою жизнь в условиях сочетания нагревающего микроклимата с физической нагрузкой, определяется свойствами термостатичности и предельной

термостатичности организмов при заданных условиях.

2. Термостатичность организма определяется физиологическими процессами, которые являются основой реакций, теплопроводности и может быть оценена на основе данных эрготермического анализа.

3. Предельная термоадаптивность организма определяется нормальными процессами регулирования температуры прироста температуры.

4. Представление эмпирических уравнений отображения, но и как взаимоотношений в органофизиологическом анализе.

Physiological tolerance: integral estimation. Its relation to physiological and mathematical static and thermodynamic mechanisms.

Institute of Labour Hygiene and Occupational Diseases, Donetsk.

1. Александров В. Я. Клеточная термостатичность. — М.: Медицина, 1979. — 323 с.
2. Биохимические методы исследования. — М.: Медицина, 1979. — 106 с.
3. Гительзон И. И., Терсков В. В. Биофизика, биохимия. — М.: Медицина, 1979. — 232 с.
4. Гуревич М. И., Берштейн Л. М. Физиология человека. — М.: Медицина, 1979. — 232 с.
5. Максимович В. А. Методы исследования физиологической устойчивости организма по критериям адаптации. — М.: Медицина, 1980. — 45—47 с.
6. Максимович В. А., Горещук В. В. Особенности взаимосвязи физиологической устойчивости организма к нагреванию. — М.: Медицина, 1981. — 1113—1117 с.
7. Максимович В. А., Шевченко В. В. Особенности физиологической устойчивости человека к нагреванию. — М.: Медицина, 1981. — 255 с.
8. Слынько П. П. Потоотделение. — М.: Медицина, 1973. — 255 с.
9. Сыркина Н. Е. Газовый анализ. — М.: Медицина, 1973. — 255 с.
10. Сыркина Н. Е. Газовый анализ и экспериментаторов. — М.: Медицина, 1973. — 255 с.

Лаборатория противотепловой защиты, Донецкого института гигиены.

термоадаптивности организма и может быть оценена по времени переносимости заданных эрготермических воздействий.

2. Термогомеостатичность организма проявляется в свойстве противодействовать нарушению термического постоянства внутренней среды, определяется физиологическими процессами теплообразования и теплопереноса, которые зависят от характера обмена веществ, экономности реакций, теплопроводности тканей и тепловой конвекции с кровотоком, и может быть оценена по скорости прироста температуры тела при заданных эрготермических воздействиях.

3. Предельная термостатичность организма проявляется в свойстве сохранять нормальную жизнедеятельность при нарушении термического гомеостаза, определяется терморезистентностью тканей и процессов регулирования и может быть оценена по предельно переносимому приросту температуры тела.

4. Представление связей физиологических переменных в виде эмпирических уравнений полезно не только как форма компактного их отображения, но и как способ выявления естественного характера их взаимоотношений в организме, дополняющий возможности корреляционного анализа.

V. A. Maksimovich

PHYSIOLOGICAL TOLERANCE OF MAN TO THE ERGOTHERMAL INFLUENCES

Summary

Physiological tolerance of man to the ergothermal influences was given an integral estimation. Its relation to various functions of the organism was determined by physiological and mathematical analysis. The functional structure of the thermohomeostatic and thermostatic mechanisms was built and described.

Institute of Labour Hygiene and
Occupational Diseases, Donetsk

Список литературы

1. Александров В. Я. Клетки, макромолекулы и температура.— Л.: Наука, 1975.— 329 с.
2. Биохимические методы исследования в клинике: Справочник / Под ред. А. А. Покровского.— М.: Медицина, 1969.— 652 с.
3. Гительзон И. И., Терсков И. А. Кинетика термического гемолиза.— В кн.: Вопросы биофизики, биохимии и патологии эритроцитов. Красноярск, 1960, с. 100—106.
4. Гуревич М. И., Берштейн С. А. Основы гемодинамики.— Киев: Наук. думка, 1979.— 232 с.
5. Максимович В. А. Методика определения индивидуальных пределов физиологических напряжений.— Физиология человека, 1980, № 5, с. 943—947.
6. Максимович В. А., Гребняк В. П., Гребняк Н. В. Оценка функционального состояния организма по критериям качества регулирования функций.— Гигиена и санитария, 1980, № 1, с. 45—47.
7. Максимович В. А., Горещкий О. С. Вид эмпирического уравнения как проявление особенностей взаимосвязи физиологических показателей.— Физиология человека, 1981, № 6, с. 1113—1117.
8. Максимович В. А., Шевченко Л. С. А. с. 704602 (СССР). Способ определения тепловой устойчивости человека.— Оpubл. в Б. И., 1979, № 47.
9. Слынько П. П. Потоотделение и проницаемость кожи человека.— Киев: Наук. думка, 1973.— 255 с.
10. Сыркина Н. Е. Газовый анализ в медицинской практике: Пособие для клинициста и экспериментаторов.— М.: Медгиз, 1956.— 222 с.

Лаборатория противотепловой защиты рабочих
Донецкого института гигиены труда и профзаболеваний

Поступила в редакцию
19.08.81