DOI: https://doi.org/10.31392/UDU-nc.series15.2026.03(202).01

Анацький А.С.
кандидат технічних наук, доцент
Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське
https://orcid.org/0000-0001-5689-7660

БІОХІМІЧНІ АСПЕКТИ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ М'ЯЗОВОЇ ДІЯЛЬНОСТІ

У статті охарактеризовано біохімічні та вікові особливості процесів енергозабезпечення м'язової діяльності. М'язова тканина має широкий діапазон функціональних і метаболічних можливостей для здійснення інтенсивної механічної роботи, що потребує швидкого поповнення запасів АТФ в клітинах. Сучасний рівень розвитку біохімічних, фізичних та інших методів досліджень дозволив переглянути окремі усталені положення щодо взаємодії різних механізмів енергопродукції під час інтенсивних фізичних навантажень. Метою даної статті є огляд наукових джерел щодо сучасних уявлень про механізми енергозабезпечення в умовах м'язової діяльності різної інтенсивності і тривалості та їх вікові зміни. Охарактеризовано анаеробні та аеробний механізми продукування енергії в м'язовій тканині. Відмічено, що при інтенсивному фізичному навантаженні відновлення вмісту АТФ у м'язах відбувається в анаеробних умовах за рахунок розщеплення креатинфосфату і процесу гліколізу, а в аеробних умовах в результаті сукупності реакцій окислення органічних речовин. Анаеробні механізми значною мірою забезпечують ресинтез АТФ при високоінтенсивних і короткочасних фізичних навантаженнях.

Ключові слова: *АТФ, гліколіз, енергія, креатинфосфат, м'язове скорочення, окислення, ресинтез*

Anatskyi A.S. Biochemical aspects of energy supply of muscle activity. *The article describes the biochemical and age-related features of the processes of energy supply of muscle activity. Muscle tissue has a wide range of functional and metabolic capabilities for performing intensive mechanical work, which requires rapid replenishment of ATP reserves in cells. The current level of development of biochemical, physical and other research methods has allowed us to revise some established positions regarding the interaction of various mechanisms of energy production during intense physical exertion. The purpose of this article is to review scientific sources regarding modern ideas about the mechanisms of energy supply in conditions of muscular activity of various intensity and duration and their age-related changes. Renewal of ATP in the cells of muscle tissue is due to the functioning of three different energy supply mechanisms – phosphagenic, glycolytic and oxidative. Anaerobic and aerobic mechanisms of energy production in muscle tissue are characterized. It has been shown that the approximately equal contribution to the synthesis of ATP by aerobic and anaerobic mechanisms is averaged between 1 and 2 minutes from the beginning of physical exertion. It is noted that during intense physical exertion, the restoration of ATP content in muscles occurs under anaerobic conditions due to the breakdown of creatine phosphate and the process of glycolysis, and under aerobic conditions as a result of a set of reactions of oxidation of organic substances. Anaerobic mechanisms largely ensure the resynthesis of ATP during high-intensity and short-term physical exertion. Further investigation of the interaction of the main energy supply systems of muscle activity will allow the development of biochemical markers for diagnosing changes in the functional state of the body for intensive physical exertion.*

Keywords: *ATP, glycolysis, energy, creatine phosphate, muscle contraction, oxidation, resynthesis*

Постановка проблеми. Дослідження механізмів енергозабезпечення і способів підвищення їх ефективності в умовах інтенсивного фізичного навантаження є актуальною науково-практичною задачею, яка завжди була у фокусі уваги біохіміків, фізіологів, медиків, спортсменів. Розуміння шляхів утворення енергії в клітині і важелів впливу на цей процес створює підґрунтя для розробки критеріїв оцінки функціонального стану спортсменів, оптимальних програм тренувань і відновлення в різних видах спорту і, в цілому, підвищення працездатності організму людини. Хоча основні положення біоенергетики клітинних процесів розроблені і відомі досить давно, розвиток сучасних біохімічних, фізичних, фізико-хімічних методів досліджень дозволив в останні десятиліття отримати нові дані щодо перебігу процесів енергетичного метаболізму і переглянути окремі, усталені погляди на енергозабезпечення м'язової діяльності.

Аналіз літературних джерел. Порівняно з іншими тканинами організму людини, скелетні м'язи мають найбільший діапазон метаболічної активності для здійснення своїх функцій. Хоча в стані спокою метаболічна активність м'язів досить низька, в умовах інтенсивного м'язового скорочення вона може зрости в 100 і більше разів [1]. Аналогічний показник при переході від стану спокою до умов максимальної функціональної активності збільшується, наприклад, для печінки лише вдвічі, для головного мозку – в 4–5 разів.

Інтенсивне м'язове скорочення потребує специфічної організації процесів продукування енергії в клітинах м'язової тканини. Енергія, необхідна для м'язового скорочення, вивільняється в реакції гідролізу аденозинтрифосфату (АТФ). Власних запасів АТФ у м'язах достатньо для забезпечення роботи високої інтенсивності лише упродовж кількох секунд, тому для здійснення тривалого м'язового скорочення потрібне швидке поповнення вичерпаних запасів АТФ [2; 4; 6]. Відновлення вмісту АТФ в клітинах м'язової тканини відбувається за рахунок функціонування трьох різних механізмів енергозабезпечення – фосфагенного, гліколітичного та окислювального [9]. Внесок кожного з цих механізмів в продукування енергії може суттєво відрізнятись і залежить від інтенсивності і тривалості фізичного навантаження, виконуваного під час занять спортом, тренувань, змагань тощо.

Упродовж постнатального онтогенезу в організмі людини відбуваються істотні біохімічні зміни енергозабезпечення м'язової діяльності. Це зумовлено тим, що диференціювання клітин і ростові процеси спираються

на різні за своїм характером метаболічні процеси. Кожен віковий період складається з фази диференціювання із гальмуванням росту і наступної фази активації ростових процесів та розширення функціональних можливостей на основі сформованого нового метаболічного стану клітин.

Мета статті (постановка завдань). Мета статті – провести огляд наукових джерел щодо сучасних уявлень про механізми енергозабезпечення в умовах м'язової діяльності різної інтенсивності і тривалості та їх вікові зміни.

Виклад основного матеріалу дослідження. Фосфагенний (алактатний) механізм енергозабезпечення для реакції ресинтезу АТФ використовує енергію, що вивільняється в результаті розщеплення креатинфосфату (КрФ). Цей механізм, хоча і забезпечує швидке утворення АТФ, має короткий час дії, оскільки низькі запаси КрФ в клітинах м'язової тканини достатні для задоволення енергетичних потреб м'язів лише упродовж 3–15 с інтенсивного фізичного навантаження. Таким чином, фосфагенний механізм є ефективним у випадку короткочасних або обмежених за кількістю повторних м'язових скорочень, що характерно для бігу на короткі дистанції, стрибків, штовхання ядра та інших вправ з легкої і важкої атлетики, гімнастики [2]. Використання сучасних методів біохімічних досліджень дозволило довести, що алактатний механізм енергозабезпечення домінує в перші 5-6 с інтенсивного фізичного навантаження з поступовим затуханням і переключенням на гліколітичний механізм ресинтезу АТФ [9]. При цьому максимальна швидкість гідролізу КрФ відмічена лише упродовж 1–2 с. Повне відновлення запасів КрФ у м'язах відбувається протягом 5–15 хв. в залежності від ступеню зменшення його вмісту.

Гліколітичний (лактатний) механізм енергозабезпечення функціонує в анаеробних умовах. При цьому енергія, необхідна для ресинтезу АТФ, вивільняється в реакції розпаду глюкози з утворенням молочної кислоти. Глюкоза, в свою чергу, виділяється при гідролізі глікогену. Гліколітичний механізм налічує 10 послідовних біохімічних реакцій, для перебігу яких потрібен певний час. Саме тому даний механізм енергопродукції набуває першочергового значення у випадку фізичного навантаження високої інтенсивності тривалістю 1–2 хв. (біг, плавання на середні дистанції, статичні силові вправи). По мірі накопичення молочної кислоти і зниження pH внутрішньоклітинного середовища процес гліколізу і, відповідно, вивільнення енергії сповільнюються. Раніше вважалось, що гліколітичний механізм починає реалізовуватись після повного вичерпання запасів КрФ, наразі доведено, що перехід на гліколіз відбувається приблизно на 5–7 с фізичного навантаження і досягає максимуму на 10–15 с [8].

Окислювальний механізм енергозабезпечення м'язової діяльності продукує енергію за рахунок аеробного окислення вуглеводів і жирів. Цей механізм є основним при тривалому фізичному навантаженні (біг на довгі дистанції, лижні і велоперегони). В якості субстратів окислення виступають глюкоза, отримувана при розпаді глікогену м'язів, і жирні кислоти, які вивільняються при гідролізі тригліцеридів м'язів і жирової тканини. Встановлено, що в першу чергу окислюються вуглеводи, запаси яких в організмі обмежені, а потім жири [7, 12]. Що ж стосується білків, то раніше вважалось, що їх участь в енергетичному обміні м'язової тканини є незначною. Проте результати останніх досліджень свідчать, що внесок білків в продукцію енергії може становити до 15% за умови тривалості фізичного навантаження на рівні кількох годин [8]. При цьому відбувається руйнація білків м'язів скелету, що зумовлює необхідність поповнення цих втрат шляхом коригування раціону харчування спортсменів.

Досить важливим є питання співвідношення внесків кожного з механізмів енергозабезпечення у продукування енергії під час фізичного навантаження. Якщо раніше вважалось, що окислювальний механізм долучається до процесу енергоутворення на 2–3 хв. від початку інтенсивного м'язового скорочення, то наразі відомо, що всі три механізми задіяні в тій чи іншій мірі при всіх видах м'язової діяльності. Показано, що приблизно рівний внесок в синтез АТФ аеробного та анаеробних механізмів відмічається в середньому між 1 і 2 хв. [3; 5].

Чисельні дослідження підтверджують нерівномірний розвиток механізмів енергозабезпечення м'язової діяльності упродовж дозрівання організму. Суттєві зміни потерпає окислювальний механізм, що пов'язано з віковою зміною вмісту ключових окисних ферментів у тканині скелетних м'язів, і структури дихального ланцюга мітохондрій.

Встановлено, що у віці 9–11 років в скелетних м'язах хлопчиків підтримується максимальна концентрація цитохрому *а* порівняно з іншими періодами онтогенезу. Спроможності окислювального механізму енергозабезпечення у м'язах збільшуються до початку статевого дозрівання, надалі вони дещо знижуються. Це підтверджується і даними електронно-мікроскопічних досліджень: кількість мітохондрій по відношенню до площі міофібрил досягає максимуму в препубертатний період, а потім знижується. Також система капілярів у м'язах кінцівок виявляється найбільш розвиненою у дітей віком 9–11 років, тобто у тому віці, коли у м'язовій тканині відмічається найбільший вміст окисних ферментів [10; 11].

Отже, віковий розвиток аеробного механізму енергопродукції у скелетних м'язах проходить через виражений максимум у препубертатному віці, що істотно впливає на функціонування всієї системи енергозабезпечення м'язової діяльності. В цей період дитячий організм має специфічні пристосування для інтенсивного постачання кисню у м'язи. Наприклад, відомо, що у дітей молодшого шкільного віку активність карбоангідрази суттєво вища, ніж у підлітків, а в останніх вища, ніж у юнаків. Це дозволяє дітям повніше використовувати ефект Бора, що сприяє віддачі кисню оксигемоглобіном при протіканні крові через капіляри м'язів. При цьому дихальна функція крові також не обмежує здатність дітей активно використовувати аеробні механізми для енергозабезпечення м'язової діяльності. Так, киснева ємність крові дітей вже у віці 5–6 років майже не відрізняється від величин, характерних для організму дорослої людини.

У пубертатному періоді відмічається стрімке збільшення швидкості ростових процесів, відоме як пубертатний стрибок росту. В цей період активуються гіпофізарно-гіпоталамічні процеси регулювання гонадотропної функції з певною роллю щитоподібної залози. Гормон тироксин, який виробляється щитоподібною залозою, активізує тканинне окиснення, в першу чергу за рахунок збільшення числа мітохондрій.

В процесі статевого дозрівання енергетичний обмін в клітинах скелетних м'язів суттєво змінюється. В першу чергу, відбувається значне збільшення потенціалу анаеробних механізмів енергопродукції на фоні зниження активності окислювального механізму. Після статевого дозрівання м'язова тканина за своїми можливостями енергозабезпечення принципово відрізняється від інших тканин організму. Однією з причин такої якісної перебудови є вплив чоловічих статевих гормонів. Встановлено, що під впливом тестостерону у скелетних м'язах збільшується частка волокон з високою активністю ферментів АТФаз, для яких характерний анаеробний механізм продукування енергії [10]. В той же час, у дівчаток не відмічається такого вираженого впливу статевого дозрівання на структуру і функцію скелетних м'язів. Якщо у хлопчиків вміст тестостерону зростає у чотири рази на початкових стадіях статевого дозрівання, а потім збільшується ще у 20 разів на його завершальних етапах, то у дівчаток рівень цього гормону від початкових до кінцевих стадій пубертату підвищується лише вчетверо.

Вміст глікогену у скелетних м'язах істотно збільшується у період між II дитинством (8–10 років) та юнацьким віком (17–19 років) [8]. При цьому підвищується буферна ємність крові, тоді як капілярна мережа у м'язах припиняє свій розвиток ще до того, як зростає число і розміри швидких м'язових волокон. Вважають, що припинення розвитку капілярної мережі може бути зумовлено впливом тестостерону. Підсумовуючи вищенаведені відомості можна відзначити, що діти і підлітки мають нижчий, порівняно з дорослими, рівень гліколітичної потужності, проте володіють більшою аеробною потужністю, що дозволяє їм швидше ресинтезувати АТФ і КрФ після завершення інтенсивної м'язової роботи.

Висновки. При інтенсивному фізичному навантаженні відновлення вмісту АТФ у м'язах відбувається в анаеробних умовах за рахунок розщеплення креатинфосфату і процесу гліколізу, а в аеробних умовах в результаті каскаду послідовних реакцій окислення вуглеводів, жирів і, частково, білків. Всі три системи енергозабезпечення в тій чи іншій мірі активуються при всіх видах м'язової діяльності, проте відносний внесок кожної з систем залежить від інтенсивності і тривалості виконуваного фізичного навантаження. Хоча анаеробні механізми значною мірою забезпечують ресинтез АТФ при високоінтенсивних і короткочасних фізичних навантаженнях, аеробний механізм також відіграє значну роль у забезпеченні працездатності за таких навантажень.

Результати чисельних досліджень свідчать про значне збільшення з віком ролі анаеробних механізмів енергозабезпечення для м'язової діяльності. Період статевого дозрівання є так званою межею поділу між двома якісними станами енергозабезпечення скелетних м'язів. До початку пубертатних перебудов у м'язах важливу роль в енергозабезпеченні відіграє мітохондріальне окислення. Після завершення статевого дозрівання м'язи набувають значного діапазону функціональних можливостей і ті специфічні риси організації енергетичного метаболізму, які відрізняють їх від інших тканин дорослого організму, причому роль анаеробних механізмів енергопродукції суттєво зростає. Така перебудова енергозабезпечення скелетних м'язів дозволяє в кілька разів збільшити потужність виконуваної механічної роботи, а також сприяє багатократному збільшенню працездатності і надійності функціонування організму в умовах інтенсивної м'язової діяльності.

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження взаємодії основних систем енергозабезпечення м'язової діяльності дозволять розробити біохімічні маркери для діагностики змін функціонального стану організму за інтенсивних фізичних навантажень.

References

1.Barklay, C.J. (2017). Energy demand and supply in human skeletal muscle. *Journal of Muscle Research and Cell Motility*. Vol. 38. 143–155. http://doi.org/10.1007/s10974-017-9467-7

2.Brooks, G.A. (2012). Bioenergetics of exercising humans. *Comp. Physiol*. Vol. 2. 537–562. http://doi.org/10.1002/cphy.c110007

3.Cannon, D.T. (2014). Skeletal muscle ATP turnover by ^{31}P magnetic resonance spectroscopy during moderate and heavy bilateral knee extension. *J. Physiol.* Vol. 592. 5287–5300. http://doi.org/10.1113/jphysiol.2014.279174

4.Egan, B., Zierath, J. R. (2013). Exercise metabolism and the molecular regulation of skeletal muscle adaptation. *Cell Metab*. Vol. 17. 162–184. http://doi.org/10.1016/j.cmet.2012.12.012

5.Fiedler, G.B. (2016). Skeletal muscle ATP synthesis and cellular H^+ handling measured by localized ^{31}P-MRS during exercise and recovery. *Sci. Rep*. Vol. 6. 32–37. http://doi.org/10.1038/srep32037

6.Hargreaves, M., Spriet, L.L. (2020). Skeletal muscle energy metabolism during exercise. *Nature Metabolism*. Vol. 2. 817–828. http://doi.org/10.1038/s42255-020-0251-4

7.Hawley, J. A., Leckey, J. J. (2015). Carbohydrate dependence during prolonged, intense endurance exercise. *Sports Med.* Vol. 45, Issue 1. 5–12. http://doi.org/10.1007/s40279-015-0400-1

8.Howarth, K. R. (2010). Effect of glycogen availability on human skeletal muscle protein turnover during exercise and recovery. *J. Appl. Physiol.* Vol. 109. 431–438. http://doi.org/10.1152/japplphysiol.00108.2009

9.Kolumbet, A.N., Natroshvili, S.G., Chernovsky, S.M. (2018). Energy supply during cyclist muscular activity. *Journal of Physical Education and Sport*. Vol. 18. Issue 1. 98–102. http://doi.org/10.7752/jpes.2018.01012

10. Krivolapchuk, I.A. (2011). Energy supply for muscle activity in 13-to14-year-old boys depending on the rate of puberty. *Human Physiology*. Vol. 37. 75–84. http://doi.org/10.1134/s0362119711010087

11. Perry, C. G. R. (2012). Mitochondrial creatine kinase activity and phosphate shuttling are acutely regulated by exercise in human skeletal muscle. *J. Physiol*. Vol. 590. 5475–5486. http://doi.org/10.1113/jphysiol.2012.234682

12. Spriet, L. L. (2014). New insights into the interaction of carbohydrate and fat metabolism during exercise. *Sports Med.* Vol. 44, Issue 1. 87–96. http://doi.org/10.1007/s40279-014-0154-1

Стаття надішла до редакції / Received 10.02.2026
Прийнята до друку / Accepted 19.02.2026