

Ocena obciążenia pracą fizyczną dynamiczną na stanowisku pracy

dr med. Joanna Bugajska - Centralny Instytut Ochrony Pracy
(artykuł z pakietu edukacyjnego „Nauka o pracy - bezpieczeństwo, higiena, ergonomia” CIOP)

1. Wprowadzenie

Analiza energetycznych zmian zachodzących podczas wysiłku jest często stosowaną metodą oceny obciążenia na stanowisku pracy, wynikającego z wykonywania pracy fizycznej z dużym udziałem wysiłku dynamicznego.

Ocena kosztu energetycznego różnych czynności występujących w pracy zawodowej ma duże znaczenie w ergonomii i praktyce zakładowych służb bezpieczeństwa i higieny pracy. Informacje tego typu umożliwiają bowiem dokonanie charakterystyki stanowisk pracy i mogą być pomocne w doborze pracowników do określonych prac.

Podczas pracy fizycznej energia produkowana przez organizm jest zamieniana w części na pracę mechaniczną (do 25%) i ciepło. Wydatek energetyczny, definiowany jako ilość energii wydatkowanej przez organizm podczas wykonywania czynności roboczych jest często stosowaną miarą ciężkości pracy. Na ilość energii zużywanej przez organizm w czasie wykonywania pracy składa się wydatek energetyczny spoczynkowej przemiany materii oraz energia zużytkowana na wykonanie danej czynności, czyli tzw. wydatek energetyczny pracy efektywnej (lub netto).

Zgodnie z układem jednostek SI, wydatek energetyczny określany jest w jednostkach pracy, czyli w dżulach (J) na jednostkę czasu lub w watach (W).

Często również koszt energetyczny pracy przedstawiany jest w watach w przeliczeniu na powierzchnię ciała (W/m^2). Ponadto, ze względu na długoletnie funkcjonowanie jednostek kalorymetrycznych kalorii (cal) lub kilokalorii (kcal) w określeniu wydatku energetycznego, jednostki te wciąż spotykamy w praktyce przemysłowej, w przepisach czy podręcznikach przy określaniu ciężkości pracy.

2. Energetyczne kryteria oceny ciężkości pracy

Wydatek energetyczny często jest stosowany jako energetyczne kryteria ciężkości pracy fizycznej. Do oceny ciężkości pracy wykorzystywana jest wielkość wydatku energetycznego w ciągu zmiany roboczej. Energetyczne kryteria ciężkości pracy fizycznej przedstawione są w tabeli 1.

Najmniejszym wydatkiem energetycznym charakteryzują się prace wykonywane w pozycji siedzącej, np. prace biurowe. Zapotrzebowanie energii podczas wykonywania tych prac wynosi na ogół mniej niż 8 kJ/min, w zakresie od 1,26 kJ/min (pozycja siedząca) do 7 kJ/min (maszynopisanie). W ciągu zmiany roboczej wydatek energetyczny takiej pracy wynosi od 1200 do 3500 kJ netto, a prace takie zalicza się do prac lekkich.

Do kategorii prac średnio ciężkich zalicza się prace związane z wykonywaniem czynności o wydatku energetycznym w granicach $8 \div 20$ kJ/min. Przykładem takich prac są prace związane z obsługą większości maszyn i urządzeń oraz prace montażowe.

Prace ciężkie i bardzo ciężkie to takie, które wymagają dźwigania ciężarów (załadunek towarów) lub używania ciężkich narzędzi (łopata, kilof, młot pneumatyczny i inne). Wydatek energetyczny podczas wykonywania takich czynności wynosi od 25 do 50 kJ/min, a wydatek energetyczny w ciągu zmiany roboczej może przekraczać 8400 kJ dla mężczyzn i 5000 kJ dla kobiet.

Dla kobiet ustalono poziom wydatku energetycznego na poziomie 5000 kJ w ciągu zmiany roboczej oraz 20 kJ na minutę podczas czynności roboczych jako wielkości, powyżej których nie mogą one wykonywać pracy. Dla mężczyzn nie określono w przepisach dozwolonych norm wydatku energetycznego, ale powszechnie przyjmuje się, że stała praca o wydatku powyżej 8400 kJ (2000 kcal) jest pracą bardzo ciężką.

3. Metody określania wydatku energetycznego

Ocenę kosztu energetycznego można ocenić następującymi metodami:

- metody tabelaryczne
- metoda oparta na podstawie pomiaru częstości skurczów serca
- metody kalorymetrii bezpośredniej i pośredniej.

Metody tabelaryczne

Przy braku możliwości wykonania pomiaru wydatku energetycznego jedną z wymienionych wcześniej metod, wartości te możemy określić za pomocą szacunkowej metody chronometrażowo-tabelarycznej, odczytując z tabel wartość wydatku energetycznego dla typowych czynności występujących w życiu codziennym i pracy zawodowej. Metoda szacowania wielkości wydatku energetycznego przy użyciu gotowych tabel jest obciążona największym błędem i może być stosowana jedynie w szczególnych przypadkach przy uwzględnieniu różnic wynikających ze specyfiki branż przemysłowych i zmian technologicznych, jakie się dokonały w ostatnich latach na ocenianych stanowiskach.

Szczególną formą szacowania wielkości wydatku energetycznego na stanowiskach pracy metodą chronometrażowo-tabelaryczną jest metoda Lehmana. Metoda ta uwzględnia pozycję i rodzaj grup mięśniowych zaangażowanych przy wykonywaniu pracy.

Metoda Lehmana jest dwuetapowa (tabela 2). W etapie pierwszym dokonuje się oceny pozycji podczas pracy i, stosując tabelę 2A, szacuje się wydatek energetyczny, wynikający z utrzymania tej pozycji. W etapie drugim, na podstawie analizy czynności roboczych, ocenia się główne grupy mięśni wykonujących te czynności i, stosując tabelę 2B, szacuje się wydatek energetyczny, wynikający z wykonywania tej czynności. Koszt energetyczny pracy określa się poprzez zsumowanie wyników uzyskanych w obu omówionych etapach.

Ocena ciężkości pracy na podstawie zmian częstości skurczów serca

Każda praca fizyczna, a dynamiczna szczególnie, powoduje pobudzenie układu krążenia i oddechowego oraz mechanizmów termoregulacji. Jest to związane z pokryciem zwiększonego zapotrzebowania pracujących mięśni na tlen i substraty energetyczne pochodzące ze źródeł pozamięśniowych oraz stanowi efektywne usuwanie z mięśni produktów przemiany materii i nadmiaru wyprodukowanej energii, zapobiegając tym samym wzrostowi temperatury ciała.

Stopień zmian wskaźników określających czynność tych układów może więc być podstawą szacunkowej oceny intensywności pracy wykonanej przez organizm. Metody oparte na pomiarach wielkości pobierania tlenu i wentylacji omówione zostaną przy okazji metod kalorymetrii pośredniej.

Innym parametrem często stosowanym do oceny kosztu energetycznego i tym samym stopnia ciężkości pracy jest analiza częstości skurczów serca podczas pracy. Metoda ta jest mniej złożona niż pomiar pobierania tlenu, ale dokładność jej jest stosunkowo mała. Częstość skurczów serca może być łatwo rejestrowana w sposób ciągły, na przykład przy użyciu metod telemetrycznych lub mierzona ręcznie przez badanie tętna. Ten ostatni sposób zmniejsza jeszcze bardziej dokładność tej metody i jest trudny do przeprowadzenia bez ograniczania swobody ruchów pracownika.

Częstość skurczów serca jest zależna od wielu endo- i egzogennych czynników. Największy wpływ na częstość skurczów serca wywiera wysiłek dynamiczny i stres cieplny. Nie można pomijać jednak również wpływu, jaki na częstość skurczów serca wywiera wysiłek statyczny, obciążenie psychiczne, hałas oraz stan zdrowia pracownika.

Metoda oceny wydatku energetycznego podczas pracy na podstawie pomiaru częstości skurczów serca ma zastosowanie jedynie w przypadku pracy dynamicznej, z zaangażowaniem dużych grup mięśniowych, przy małym statycznym obciążeniu mięśni i przy braku wpływu stresu cieplnego i obciążenia psychicznego pracownika podczas pracy.

Zależność między częstością skurczów serca i kosztem energetycznym pracy może być opisana następującym wzorem:

$$M = 4,0 \cdot HR - 255, (*)$$

gdzie:

M - jest kosztem energetycznym pracy, w W/m^2

HR - jest częstością skurczów serca zmierzoną podczas pracy.

(*) według normy ISO 8996. 1990. Ergonomics - Determination of metabolic heat production.

Metody kalorymetryczne

Metoda kalorymetrii bezpośredniej

Wydatek energetyczny człowieka podczas wysiłku można ocenić na podstawie pomiaru ilości ciepła wytwarzanego w organizmie metodą kalorymetrii bezpośredniej, wykonywanego w specjalnych kamerach kalorymetrycznych. Metoda ta ze względów oczywistych nie nadaje się do stosowania na stanowiskach pracy.

Metoda kalorymetrii pośredniej

Inną powszechniej obecnie stosowaną metodą jest kalorymetria pośrednia. Zasada kalorymetrii pośredniej opiera się na zależności między ilością pobieranego przez organizm tlenu w jednostce czasu a ilością energii uwolnionej w procesach metabolicznych.

Kalorymetria pośrednia jest szczególnie przydatna podczas wysiłków, w których przeważają procesy tlenowe (aerobowe). Ilość energii uzyskana w procesach metabolicznych, przy użyciu 1 litra tlenu jest różna, w zależności od rodzaju spalanej substancji, np. podczas spalania glukozy - 21,1 kJ, tłuszczów zaś - 19,6 kJ. Tak więc, wielkość równoważnika energetycznego 1 litra tlenu (niezbędna do przeliczenia ilości tlenu pobieranego podczas pracy na wielkość wydatku energetycznego) waha się od 19,6 do 21,1 kJ. Do wyboru odpowiedniego równoważnika konieczne jest określenie wielkości ilorazu oddechowego, czyli stosunku ilości wydalanego dwutlenku węgla do ilości pobranego w tym samym czasie tlenu. Tak więc, ocena wydatku energetycznego tą metodą sprowadza się do pomiaru objętości pobieranego przez organizm tlenu i wydalonego dwutlenku węgla, wyliczeniu ilorazu oddechowego i pomnożeniu objętości pobranego tlenu przez odpowiedni równoważnik energetyczny, którego wartości są podawane w tabelach, w wielu podręcznikach z tej dziedziny.

Metoda ta polecana jest również w normie ISO 8996. 1990. Ergonomics - Determination of metabolic heat production.

Metoda oparta na pomiarze wentylacji płuc

Oznaczenie wydatku energetycznego na stanowiskach pracy klasyczną metodą kalorymetrii pośredniej wymaga odpowiedniej aparatury, doświadczenia osób wykonujących pomiar i w rzeczywistych warunkach, na stanowiskach pracy nie zawsze jest możliwe. W praktyce przemysłowej do pomiaru wydatku energetycznego często stosuje się metodę opartą na wynikach pomiaru objętości wydychanego (lub wdychanego) powietrza, czyli wentylacji płuc. Pomiędzy wielkością zużycia tlenu podczas wysiłku i wielkością minutowej wentylacji istnieje wysoki współczynnik korelacji i prawie liniowa zależność.

Na podstawie zależności między wentylacją a zużyciem tlenu można obliczyć przybliżoną wartość wydatku energetycznego, posługując się równaniem Datta-Ramanathana:

$$E = 0,21 \cdot V_{E(STPD)}$$

gdzie:

E - wydatek energii, w kJ/min,

$V_{E(STPD)}$ - wentylacja płuc, w l/min w warunkach STPD (objętość gazu suchego w temperaturze 0 °C i ciśnieniu atmosferycznym 101,3 kPa).

Pomiar wydatku energetycznego przy użyciu miernika MWE

Pomiar wydatku energetycznego, dokonany opracowanym w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy miernikiem MWE, oparty jest na opisanej wcześniej zależności liniowej i wysokim współczynniku korelacji pomiędzy wielkością wentylacji płuc, pobieraniem tlenu i wydatkiem energetycznym. Miernik wydatku energetycznego MWE jest przenośnym, lekkim, o małych wymiarach aparatem umożliwiającym dokonanie pomiaru wydatkowanej energii w czasie wykonywania pracy fizycznej dynamicznej na stanowisku roboczym. To znaczy w sytuacji, w której utrudnione jest bezpośrednie określanie ilości pobieranego tlenu i wydalanego dwutlenku węgla. Ponadto miernik MWE, ze względu na łatwość obsługi przeznaczony jest do powszechnego stosowania w zakładach pracy przez przeszkolone osoby.

Zasada działania

Za pomocą miernika MWE dokonuje się pomiaru wentylacji minutowej płuc w czasie wykonywania wysiłku. W tym celu zakłada się na twarz dokładnie dopasowaną półmaskę, z wmontowanym przepływomierzem turbinowym połączonym z miernikiem. Wdech osoby badanej powoduje uruchomienie turbiny. Obroty turbiny są zliczane i dają wartość przepływu powietrza. Zmierzona wartość przepływu przeliczana jest na objętość gazu w warunkach STPD. Miernik automatycznie wprowadza niezbędne dla takiego przeliczenia dane dotyczące temperatury otoczenia oraz współczynnik dla ciśnienia atmosferycznego uśrednionego na obszar Polski.

Do wyliczeń wprowadzono również współczynnik korekcyjny, który weryfikuje wyniki z pomiaru wentylacji minutowej płuc do wyników uzyskanych w klasycznej metodzie obliczania wydatku energetycznego z bezpośredniego pomiaru zużycia tlenu.

Wprowadzenie za pomocą klawiatury miernika danych dotyczących masy ciała, wzrostu, wieku oraz płci osoby badanej i wykonanie pomiaru umożliwia automatyczne wyliczenie przez miernik MWE wartości wydatku energetycznego netto, tj. ilości energii wydatkowanej przez badaną osobę w pracy oraz wydatku energetycznego brutto z uwzględnieniem podstawowej przemiany materii. Wyniki pomiaru zgodnie z życzeniem podawane są w kcal, kJ lub W/m².

Badania porównawcze, laboratoryjne oraz terenowe, wykazały dużą zbieżność wyników badań uzyskanych za pomocą miernika i aparatu umożliwiającego pomiar pobierania tlenu i wydalania dwutlenku węgla, zwłaszcza przy ocenie pracy lekkiej, średnio ciężkiej i ciężkiej. Różnice mogą się pojawiać przy pracy bardzo lekkiej lub w spoczynku. Zawyżone w tych okolicznościach wartości wentylacji płuc mogą być skutkiem wpływu innych czynników, głównie emocjonalnych, związanych z wykonywaniem badań. Różnice mogą pojawić się również przy pomiarze wydatku energetycznego podczas pracy bardzo ciężkiej, gdy wielkość wentylacji płuc przekracza 60 litrów na minutę. W tym przypadku jest to spowodowane przekroczeniem granic zależności liniowej między zużyciem tlenu a wentylacją płuc (hyperwentylacja).

Warunki poprawnego wykonania pomiaru

Osoba badana powinna być poinformowana co do celu i przebiegu wykonania pomiarów. Warunkiem prawidłowego wykonania pomiaru jest staranne dopasowanie półmaski do

twarży. Należy w tym celu uwzględnić wymiary oraz kształt twarzy i dobrać właściwy rozmiar półmasek. Ponadto należy odpowiednio ściągnąć paski gumowe mocujące półmaskę na twarzy. Pomiar wentylacji płuc przeprowadza się kilkakrotnie przez kilka minut i zawsze po kilku minutach pracy w półmasce, co jest niezbędne do przyzwyczajenia się pracownika do pracy w półmasce oraz unormowania oddechu zakłóconego w pierwszej fazie przez założenie półmasek.

Warunkiem prawidłowego obliczenia wielkości wydatku energetycznego, poza zachowaniem zasad prawidłowego pomiaru, jest ustalenie chronometrażu dnia pracy, polegającego na pomiarze i zapisie czasu trwania poszczególnych czynności roboczych.

Chronometraż powinien być przeprowadzony w dniach o przeciętnym rytmie pracy i obejmować typowe czynności związane z obsługą stanowiska pracy, powtarzające się każdego dnia. W dokumentacji wszystkie rodzaje czynności roboczych, jak również czynności pomocnicze i przerwy w pracy, powinny być pogrupowane w cykle o podobnym obciążeniu pracą. Najlepiej jest, gdy chronometraż pracy opracowany jest wspólnie z pracownikiem, jego przełożonym i pracownikiem służb bhp. Pomiar czasu trwania poszczególnych czynności powinien być wykonywany kilkakrotnie, dla różnych osób i przy różnej intensywności pracy, aby można było uzyskać charakterystyczną, uśrednioną fotografię dnia roboczego na określonym stanowisku.

Często popełnianym błędem podczas ustalania chronometrażu jest nadmierne rozczłonkowanie procesu pracy na krótkotrwałe czynności, zamiast zgrupowanie ich w wyodrębnione, łatwo identyfikowane i powtarzające się cykle. Innym, również często występującym nieporozumieniem jest dążenie do uwzględniania w dniówce również czynności roboczych, które chociaż charakterystyczne dla danego zawodu, pojawiają się stosunkowo rzadko, np. podczas awarii.

Ocena kosztu energetycznego złożonych operacji roboczych jest obciążona błędem, nawet przy zastosowaniu bezpośredniego pomiaru zużycia tlenu na stanowiskach pracy. Podczas standardowych, prostych czynności wykonywanych przez tego samego człowieka wyniki powtarzanych pomiarów różnią się przeciętnie o $\pm 5\%$, a przy złożonych operacjach o $\pm 10\%$. Wartości wydatku energetycznego zmieniają się również ze względu na technikę pracy, staż, jej intensywność, doświadczenie zawodowe i rodzaj używanych narzędzi.

Dużo trudności nastręcza również oszacowanie wydatku energetycznego podczas całej zmiany roboczej, ponieważ pomiary wiążą się z koniecznością stosowania masek lub ustników do zbierania powietrza wydychanego, co może być uciążliwe dla badanych. Pomiary przeprowadza się więc na ogół w ciągu zaledwie kilku minut, podczas wykonywania podstawowych czynności roboczych, a następnie sumuje się koszt energetyczny tych czynności. Trudności w ocenie czasu wykonywania poszczególnych czynności mogą być źródłem dodatkowego błędu. Zarówno konieczność notowania czasu przez samych badanych, jak i obecność obserwatora są czynnikami, które mogą zakłócać normalny tryb pracy.

Czynnikiem, który należy również uwzględnić przy ocenie kosztu energetycznego pracy, jest środowisko termiczne, w jakim ta praca jest wykonywana. W środowisku termicznym gorącym następuje niewielki wzrost wydatku energetycznego spowodowany wzrostem temperatury ciała. Bardziej wzrasta wydatek energetyczny w środowisku termicznym zimnym, co spowodowane jest pojawieniem się dreszczy, a także noszeniem ciężkiej odzieży.

4. Literatura

1. Bezpieczeństwo pracy i ergonomia. Red. nauk. D. Koradecka. Warszawa, CIOP 1997.
2. Koradecka D., Bugajska J.: Ocena wielkości obciążenia pracą fizyczną na stanowiskach roboczych. Warszawa, CIOP 1998.
3. Kozłowski S., Nazar K.: Wprowadzenie do fizjologii klinicznej. Wyd. II. Warszawa, PZWL 1995.

5. Tabele

CIOP

Stopień ciężkości pracy dla kobiet i mężczyzn

Stopień ciężkości pracy	Wydatek energetyczny netto na zmianę rob. (kJ)	
	mężczyźni	kobiety
Lekka - średnio ciężka	do 6300	do 3700
Ciężka	6300 ÷ 8400	3700 ÷ 5000
Bardzo ciężka	> 8400	> 5000

Tabela 1.

Uproszczona metoda obliczania wydatku energetycznego

Pozycja ciała (A)	Wydatek energetyczny	
	kcal/min	kJ/min
Siedząca	0,3	1,26
Na kolanach, w kucki	0,5	2,1
Stojąca	0,6	2,51
Stojąca pochylona	0,8	3,35
Chodzenie	2,6	10,89
Zakres obciążenia mięśni (B)		
Praca palców, dłoni i przedramienia	0,5 ÷ 1,0	2,1 ÷ 4,2
Praca jednego ramienia	1,0 ÷ 2,0	4,2 ÷ 8,4
Praca obu ramion	2,0 ÷ 3,0	8,4 ÷ 12,6
Praca całego ciała (mięśnie kończyn i tułowia)	3,0 ÷ 10,0	12,6 ÷ 41,9

Tabela 2.