Mateusz Jeleń
Paweł Bielecki
Łukasz Borawski
Łukasz Kasprzak
Oskar Górecki
Akademia Morska w Gdyni
Naukowe Koło Kajakowe „CANOE",

KAJAKIEM PRZEZ STATYKĘ

W artykule omówiono niektóre problemy związane z poruszaniem się kajakiem po wodach stojących i płynących. Opisując zachowanie kajaka w tych warunkach, odniesiono się do podstawowych pojęć mechaniki klasycznej.
Manewr promowania posłużył jako przykład wykorzystania nurtu rzeki do efektywnego przemieszczania się na wodzie płynącej. Z kolei problemy stateczności kajaka stanowią podstawę do ukazania potrzeby stosowania zasad statyki do opisu równowagi kajaka oraz zrozumienia współoddziaływania kajaka z otoczeniem.
Niniejsze opracowanie pomoże zrozumieć, jak sprawnie, a co najważniejsze, bezpiecznie i bez niepotrzebnego wysiłku, poruszać się kajakiem i podziwiać otaczające nas piękno natury.
Słowa kluczowe: *siła, kajak, promowanie, stateczność, równowaga, nurt, rzeka, siła skupiona, środek wyporu, przechył, kąt krytyczny, para sił, wiosłowanie, spływ.*

WPROWADZENIE

Kajakarstwo to wspaniałe hobby. Dzięki niemu możemy być blisko natury, możemy się poddawać jej woli, jak i wtapiać się w nią. Podczas płynięcia kajakiem można używać zarówno siły, jak i rozumu. Ograniczając się tylko do siły, zawsze będziemy odczuwać pewien dyskomfort związany z bujaniem lub omijaniem przeszkód. Jednak, gdy tylko uda się nauczyć „czytać wodę", rozpoznawać bieg prądów w rzece, rozumieć, jak kajak reaguje na działanie wody, podróże kajakiem będą zdecydowanie dłuższe, a zarazem przyjemniejsze i łatwiejsze, omijanie zaś każdej napotkanej przeszkody będzie czystą przyjemnością.

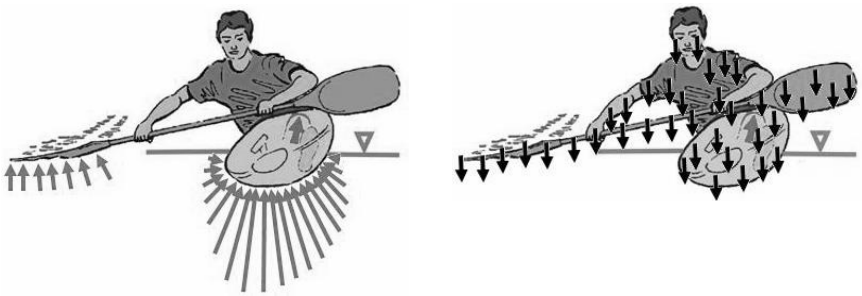
Już tych kilka zaleceń wyznacza obszary wiedzy, które należy poznać, aby swobodnie poruszać się w każdych warunkach na szlaku kajakowym. Pierwszy z tych obszarów to hydrologia. Pozwala ona na zrozumienie zjawisk związanych z przepływem wody, rozkładem prędkości wody w korycie rzeki i zmianami głębokości. Z punktu widzenia kajakarza hydrologia pozwala na wybór bezpiecznej drogi płynięcia. Jednak wybór nie oznacza jeszcze, że kajak będzie płynął tam, gdzie powinien. Aby zrozumieć to, co się dzieje z kajakiem, należy odwołać się do

pojęć klasycznej mechaniki Newtona. Bazując na prawach Newtona, przyjmując nawet najprostsze modele ciał, można przewidywać z dużym prawdopodobieństwem zachowanie się kajaka. Jest oczywiste, że same prawa Newtona nie zrobią z nieudacznika rasowego kajakarza, lecz niewątpliwie zrozumienie zjawisk zachodzących podczas współoddziaływania wody i kajaka znacznie przyspiesza proces nauki kajakarstwa. Czyni ten proces bardziej świadomym i bezpiecznym chociażby poprzez ilościową ocenę oddziaływań wody na kajak.

Podstawowym pojęciem w teorii Newtona jest siła. Pod pojęciem siły rozumieć trzeba oddziaływanie na siebie ciał. Rozpatrując ruch kajaka, należy uwzględnić: oddziaływanie wody na kadłub kajaka, oddziaływanie wody na wiosło, a także oddziaływanie powietrza i Ziemi [2].

Woda oddziałuje powierzchniowo na całe dno kajaka. Miarą tego działania jest ciśnienie hydrostatyczne. Oznacza to, że ciśnienie działające na dno jest większe w miejscach głębiej zanurzonych (rys. 1). Jednak tak prosta, liniowa zależność występuje tylko w przypadku spoczynku. Przy ruchu kajaka względem wody lub odwrotnie pojawiają się innego rodzaju oddziaływania powierzchniowe, związane ze zmianą względnej prędkości. Są to tzw. siły hydrodynamiczne. Efekt powstawania tych sił na powierzchni pióra wiosła wykorzystuje się przede wszystkim do napędzania kajaka, ale nie tylko. Podczas większości manewrów wykonywanych czy to za pomocą steru, czy też podczas stosowania specjalnych technik kajakowych, wykorzystuje się siły hydrodynamiczne. Należy tu również wspomnieć o oddziaływaniu powietrza na kajak. Jednak ze względu na to, że oddziaływanie to ma istotny wpływ na ruch kajaka tylko w określonych warunkach (duże otwarte akweny, np. jezioro, morze), w dalszych rozważaniach pominięto wpływ oddziaływania powietrza na zachowanie się kajaka.

Nie można jednak pominąć oddziaływania Ziemi. Tu sytuacja jest nieco inna niż w przypadku wody. Ziemia oddziałuje na każdy element masy kajaka oraz jego zawartości [2]. Oznacza to, że siła ta nie działa na powierzchnię ciała, lecz na każdą cząstkę kajaka. W tym wypadku mowa jest o działaniu na kajak sił masowych.

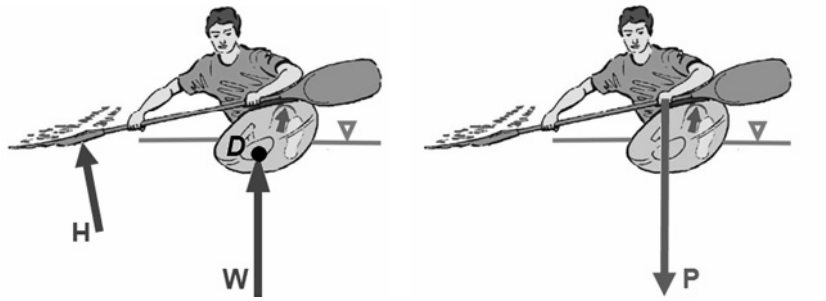


Rys. 1. Siły powierzchniowe i masowe

Fig. 1. *Surface and mass forces*

Zazwyczaj podczas analizowania ruchu kajaka powierzchniowe oddziaływanie wody oraz masowe działanie Ziemi zastępuje się ekwiwalentnymi siłami skupionymi. Skutki ich działania powinny być takie same jak skutki działania sił rozłożonych po powierzchni i masie. Dotyczy to wartości, kierunku i punktu przyłożenia siły [2].

Statyczną siłę powierzchniową odziaływania wody na kajak zastępuje się jedną siłą skupioną *W*, zwaną wyporem (rys. 2). Zgodnie z prawem Archimedesa, wartość siły wyporu jest równa ciężarowi wypartej przez kajak cieczy. Siła ta jest przyłożona w geometrycznym środku zanurzonej części kajaka. Oznacza to, że gdy kajak kołysze się, to miejsce położenia środka wyporu może ulegać zmianie.



Rys. 2. Siły skupione
Fig. 2. *Concentrated forces*

Z kolei oddziaływanie Ziemi zastępuje się siłą ciężkości *P* (rys. 2). Jest ona zaczepiona w środku ciężkości kajaka (wraz z zawartością) i skierowana pionowo w dół. Zgodnie z II prawem Newtona siłę tę określa zależność:

$$P = m \cdot g, \tag{1}$$

gdzie:

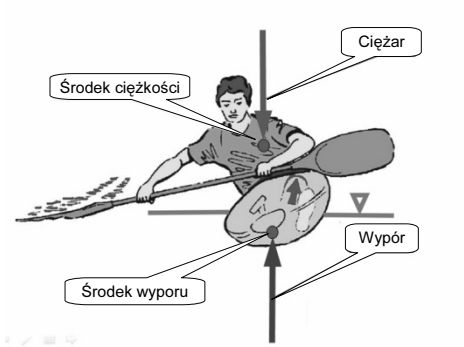
m – masa kajaka,
g – przyspieszenie ziemskie.

Wreszcie siły powierzchniowe wynikające ze względnego ruchu kajaka i wody zastąpić należy skupioną siłą hydrodynamiczną *H* przyłożoną w środku naporu (rys. 2).

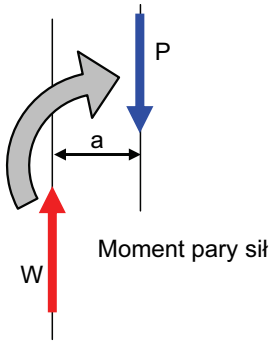
Bazując na wyżej określonych siłach skupionych, można już przeanalizować zachowanie się kajaka zarówno w czasie spoczynku, jak i podczas ruchu względem wody. Ilustrując pierwszy z wymienionych elementów, rozpatrzono stateczność kajaka. Natomiast w drugim przypadku zajęto się tzw. promowaniem, czyli techniką manewrowania kajakiem, która wykorzystuje siły hydrodynamiczne.

1. STATECZNOŚĆ KAJAKA

Pojęcie stateczności kajaka obejmuje samoczynną zdolność powrotu do stanu wyjściowego po wytrąceniu go ze stanu równowagi. W stanie równowagi statycznej na kajak działają dwie siły: ciężar i wypór (rys. 3). W normalnym położeniu kajaka siły te leżą na jednej prostej. Ciężar jest w tym układzie siłą czynną, wypór zaś siłą bierną. Oznacza to, że wartość wyporu zależy od ciężaru. Wypór, poprzez zmianę zanurzenia, niejako przystosowuje się do ciężaru. W ten sposób, niezależnie od stanu załadowania, a także od położenia kajaka, stan równowagi zostaje zachowany.



Rys. 3. Równowaga statyczna kajaka
Fig. 3. *Canoe static equilibrium*



Rys. 4. Moment pary sił
Fig. 4. *Moment of couple forces*

Sytuacja jednak zmienia się nieco, jeśli dojdzie do przechyłu kajaka. Ciężar i wypór nie leżą wtedy na jednej prostej (rys. 4). Jest to skutek przemieszczenia się środka wyporu, w związku ze zmianą kształtu zanurzonej części kadłuba kajaka. Powstaje wtedy tzw. para sił. Co prawda ich suma w dalszym ciągu pozostaje równa zeru, co jednak nie oznacza, że nie mają one wpływu na ruch kajaka. Miarą tego wpływu jest moment pary sił.

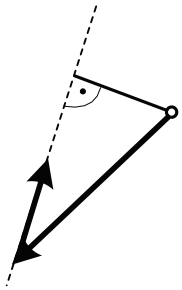
Aby określić moment pary sił, konieczna jest definicja momentu siły. W przypadku jednej siły moment siły definiowany jest jako iloczyn wektorowy siły i ramienia jej działania (rys. 5):

$$\overrightarrow{M_{/A}} = F \times r, \tag{2}$$

gdzie:

$\overrightarrow{M_{/A}}$ – moment siły względem punktu A,
F – wektor siły,
r – ramię działania siły.

Z zależności (2) wynika, że podobnie jak siła moment siły jest w sensie matematycznym wielkością wektorową. Istotne jest jednak spostrzeżenie, że moment siły zależy nie tylko od samej siły, lecz również od punktu, względem którego moment jest liczony. Dla dalszych rozważań przydatny będzie nie sam moment siły, lecz tylko jego wartość. Z właściwości iloczynu wektorowego wynika bowiem, że moment siły jest wektorem prostopadłym zarówno do wektora siły, jak i wektora ramienia siły. Oznacza to, że jeśli wektory F i r leżą w płaszczyźnie rysunku, to wektor momentu jest zawsze prostopadły do tej płaszczyzny, a wartość wektora momentu określa zależność:



Rys. 5. Moment siły względem punktu A

Fig. 5. *Moment of force about point A*

$$M_{/A} = F\, r \sin(F, r). \tag{3}$$

Uwzględniając zależności trygonometryczne (rys. 5), można równanie (3) wyrazić w łatwej do stosowania postaci:

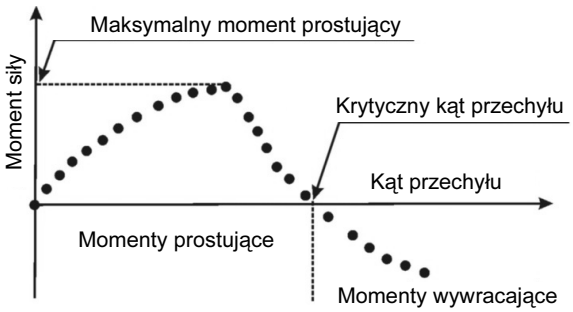
$$M_{/A} = F\, d. \tag{4}$$

Odnosząc teraz zależności (3) i (4) do rozpatrywanej pary sił oraz przyjmując, że moment pary sił jest po prostu sumą momentów sił składowych, otrzymuje się zależność:

$$M_{/A} = F\, a. \tag{5}$$

Z równania (5) wynika, że w przypadku pary sił moment nie zależy od punktu, względem którego jest liczony, lecz jest tylko funkcją odległości pomiędzy kierunkami działania sił.

To ostatnie spostrzeżenie jest bardzo istotne przy badaniu zmian momentu pary sił przy zmianach kąta przechyłu kajaka. Jakościowy obraz tych zmian przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Moment prostujący w funkcji kąta przechyłu

Fig. 6. *Righting moment in the function of the lean*

W miarę zwiększania kąta przechyłu odległość pomiędzy kierunkami działania siły ciężkości i siły wyporu rośnie. W efekcie rośnie również moment pary sił. Jest to moment o takim zwrocie, że przeciwstawia się przechyłowi, więc w teorii okrętu nosi nazwę momentu prostującego.

Powyższe zjawisko obserwuje się jednak tylko do pewnego kąta przechyłu, po którego przekroczeniu moment prostujący przestaje wzrastać i stopniowo maleje aż do zera. Ten graniczny kąt, przy którym moment prostujący ponownie przyjmuje wartość zero, nosi nazwę krytycznego kąta przechyłu. Po przekroczeniu krytycznego kąta przechyłu moment pary sił zmienia zwrot na przeciwny. W konsekwencji moment prostujący przekształca się w moment wywracający, dążący do ustawienia kajaka w nowym położeniu równowagi – dnem do góry.

Opisane zjawisko, występujące w teorii okrętu jako stateczność kształtu, jest typowe prawie dla wszystkich jednostek nawodnych. Kajak nie jest tutaj wyjątkiem. Nie oznacza to jednak, że budując kajak, nie mamy wpływu na jego właściwości statecznościowe. Traktując kajak, ładunek i kajakarza jako ciało doskonale sztywne można założyć, że podczas przechyłu środek ciężkości nie będzie przemieszczał się względem kajaka.

Natomiast kształtowanie odpowiedniej podwodnej części kadłuba wpływa na przemieszczanie się środka wyporu przy przechyłach kajaka. Przy przekroju kołowym środek wyporu praktycznie nie zmieni swojego położenia. Oznacza to, że w konsekwencji nie powstaną momenty prostujące.

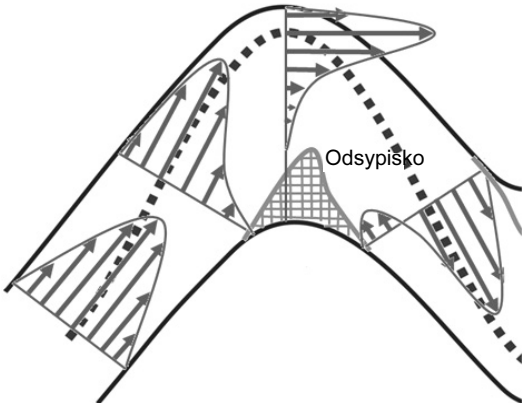
Drugi skrajny przypadek stanowi przekrój prostokątny. Tutaj podczas przechyłu będą powstawały duże momenty prostujące, ale również, po przekroczeniu krytycznego kąta przechyłu, duże momenty wywracające. Ta ostatnia cecha może uniemożliwić zastosowanie niektórych technik kajakowych, np. wysokiej podpórki lub eskimoski, niemniej świadczy o tym, że w zależności od przeznaczenia kajaka można, w pewnych granicach, dostosowywać właściwości statecznościowe do wymaganych potrzeb.

2. PROMOWANIE

Pod pojęciem promowania należy tu rozumieć jedną z technik manewrowania kajakiem. Jest to zagrywka wykonywana na wodzie płynącej, pozwalająca na przemieszczanie się w poprzek nurtu bez utraty wysokości względem brzegu. Wykorzystuje się tu nurt rzeki, który przemieszcza, ustawiony pod odpowiednim kątem do nurtu, kajak w bok [4].

Aby zrozumieć, dlaczego tak się dzieje oraz co to znaczy „odpowiedni kąt", należy przeanalizować zjawiska zachodzące w korycie rzeki. Przepływ wody w rzece nigdy nie jest laminarny. Ale nawet jeśli pominąć lokalne zakłócenia przepływu, to i tak obraz nie jest prosty. Zazwyczaj wzdłuż rzeki można wyznaczyć linię, która odzwierciedla obszar, w którym woda płynie najszybciej, tzw. nurt rzeki. Jednak już w przekrojach poprzecznych rozkłady prędkości wody nie są jednolite. Modelując przepływ (rys. 7), zakłada się, że przy brzegu prędkość

wody zanika do zera, maksymalną wartość uzyskuje w linii nurtu, natomiast sam rozkład zależy od miejsca położenia przekroju poprzecznego w stosunku do zakola rzeki.



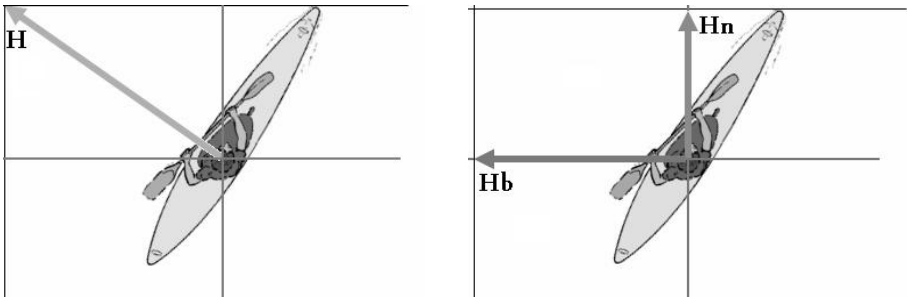
Rys. 7. Prędkość przepływu wody w przekrojach poprzecznych na zakolu rzeki
Fig. 7. *Water flow in the cross-sections of the river bend*

Znajomość nawet tak uproszczonego obrazu jest wręcz niezbędna, aby pływać efektywnie, a przede wszystkim bezpiecznie, na większości rzek nizinnych. Jak widać na rysunku 7, na prostych odcinkach najwygodniej jest płynąć środkiem koryta, gdyż tam prędkość rzeki jest największa. Sytuacja zaczyna się jednak zmieniać, gdy tylko kajak dociera do zakola. Tutaj wektor prędkości o największej wartości układa się po zewnętrznej części przekroju rzeki – przy brzegu wklęsłym. Z kajakowej praktyki wiadomo, że błędem byłoby utrzymywanie kajaka w takich miejscach w nurcie. Kończy się to bowiem zazwyczaj dociśnięciem do brzegu, a w skrajnych przypadkach wywrotką i nie zawsze przyjemną kąpielą. Podobnie należy unikać miejsc, w których ulegają zmianie zwroty wektorów prędkości, tzw. cofki. Traci się wtedy niepotrzebnie energię na przeciwstawienie się naporowi wody. Jest to jednak elementarz kajakarstwa stosunkowo łatwy do opanowania. Sytuacja zmienia się diametralnie, jeśli ten regularny i przewidywalny obraz zostanie zakłócony przez jakąkolwiek przeszkodę umieszczoną w korycie rzeki, np. zwalone drzewo. W takiej sytuacji trzeba się zatrzymać, ustawić kajak odpowiednio do przeszkody w takim miejscu, aby możliwe było bezpieczne przejście przez nią.

Zatrzymanie kajaka względem brzegu oznacza, że pojawia się ruch wody względem kajaka. A to z kolei powoduje powstawanie sił hydrodynamicznych, z którymi należy ciągle się liczyć, niekoniecznie tylko podczas zatrzymania kajaka. Przecież płynąc do przodu, również poruszamy się względem wody. Wtedy też pojawia się siła hydrodynamiczna. Pewne składowe tej siły nazywa się często oporem. Pozornie jest to dla wszystkich oczywiste i w związku z tym niedoceniane przez początkujących kajakarzy. Jednak w przypadku zatrzymania kajaka obraz jest o wiele bardziej spektakularny, chociażby z powodu względności ruchu. W codziennym życiu to my zazwyczaj poruszamy się względem nieruchomego

układu odniesienia. W omawianym przypadku to my stajemy się układem odniesienia, co powoduje kłopoty ze spojrzeniem na to samo zjawisko z odmiennej perspektywy.

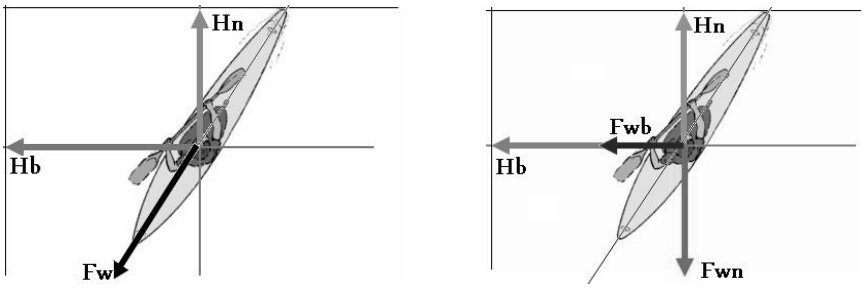
Analizę rozważanego problemu należy zacząć od tego, że po zatrzymaniu kajaka, na skutek wyhamowania wody na jego kadłubie powstaje siła hydrodynamiczna (rys. 8).



Rys. 8. Siły hydrodynamiczne
Fig. 8. *Hydrodynamic forces*

Wypadkową siłę hydrodynamiczną można rozłożyć na dwie składowe:
H_b – składowa siły hydrodynamicznej prostopadła do brzegu,
H_n – składowa siły hydrodynamicznej równoległa do nurtu rzeki.

Utrzymując kajak w tym samym położeniu względem brzegu, trzeba wiosłować wstecz. Pojawia się wtedy siła F_w, która jest przyłożona do kajaka wzdłuż jego osi (rys. 9).



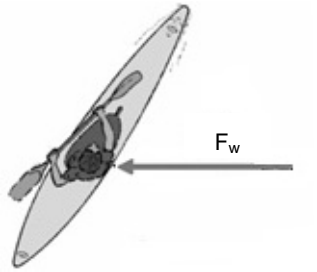
Rys. 9. Układ sił podczas wiosłowania wstecz
Fig. 9. *The balance of power while rowing back*

Siła ta powinna mieć taką wartość, aby jej składowa równoległa do nurtu równoważyła się ze składową siły hydrodynamicznej H_n, a więc:

$$F_{w_n} = -H_n. \tag{6}$$

W ten sposób suma rzutów wszystkich sił na kierunek nurtu będzie wynosiła zero, natomiast rzuty sił na kierunek prostopadły do brzegu dają wypadkową, która spowoduje przemieszczanie się kajaka w bok, w poprzek nurtu (rys. 10).

Ten prosty i czytelny obraz oddziaływania wody na promujący się kajak w praktyce stwarza jednak sporo trudności. Należy bowiem pamiętać o tym, że wartość wypadkowej siły promującej wynika z trzech przesłanek: lokalnej prędkości wody, kąta ustawienia kajaka względem linii prądu (styczna do wektorów prędkości wody) oraz siły wiosłowania.



Rys. 10. Wypadkowa siła podczas promowania

Fig. 10. *Resultant forces in ferry gliding*

Podczas przemieszczania się w poprzek koryta rzeki prędkość wody zmienia się. Ulega więc również zmianie siła hydrodynamiczna. Pośrednio z lokalną prędkością wody związany jest także kąt ustawienia kajaka. Wynika on bowiem z fizycznych możliwości kajakarza. Przy zbyt dużym kącie składowa siły hydrodynamicznej na kierunku nurtu może być zbyt duża, aby mogła być zrównoważona siłą pochodząca od wiosła. W efekcie kajak będzie przemieszczał się w dół rzeki, co w praktyce oznacza pewne kłopoty, technikę promowania stosuje się bowiem zazwyczaj nie dla zabawy, lecz w celu pokonania układu przeszkód na rzece. Stąd promowanie stanowi z jednej strony jedną z podstawowych umiejętności kajakarza, a z drugiej – jeden z trudniejszych manewrów na rzece. Poprawne wykonanie promowania daje pożądany komfort psychiczny podczas pływania oraz zapewnia pełne bezpieczeństwo nawet w najbardziej niespodziewanych sytuacjach na rzece.

PODSUMOWANIE

W artykule omówiono podstawowe zasady poprawnego, skutecznego, a co najważniejsze, bezpiecznego poruszania się kajakiem. Jednakże podstawą bezpiecznego poruszania się po wartkich rzekach jest wiedza o zachowaniu się kajaka w określonych warunkach, znajomość zjawisk zachodzących na rzece, wreszcie ocena oddziaływania wody czyli ocena sił działających na kajak.

Jednym z omówionych w artykule efektów oddziaływania środowiska wodnego na kajak są problemy stateczności. Przy kontrolowanych, bądź też nie, przechyłach należy pamiętać o przemieszczeniu się środka wyporu, występowaniu granicznego kąta przechyłu oraz pary sił, której miarą działania jest moment prostujący (lub wywracający). Umiejętność kontrolowania kąta przechyłu pozwala na utrzymanie kajaka w stanie równowagi i bezpieczne pokonywanie przeszkód na rzece.

Omówienie zaś manewru promowania miało na celu przybliżenie takiej formy wykorzystania nurtu rzeki, aby najmniejszym wysiłkiem przemieszczać się z jed-

nego brzegu na drugi. Wykorzystując technikę promowania, połączoną z „czytaniem wody", można także sprawnie poruszać się przeciwnie do nurtu rzeki. Po opanowaniu tych umiejętności każda wyprawa kajakowa będzie wspaniałą przygodą.

Aby w pełni cieszyć się chwilami spędzonymi na kajakach, na pierwszym miejscu zawsze należy postawić bezpieczeństwo uczestników spływu, a także jasność umysłu i opanowanie w każdej sytuacji na wodzie.

LITERATURA

1. Bajkiewicz-Grabowska E., *Hydrologia ogólna,* PWN, Warszawa 1999.
2. Leyko J., *Mechanika ogólna,* tom 1, *Statyka i kinematyka*, PWN, Warszawa 1976.
3. Siuta W., *Mechanika techniczna,* Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 1988.
4. Starzyński J., *Tao Kajaka*, Polski Związek Kajakowy, Warszawa 1997.

CANOE THROUGH STATICS

Summary

In this article we talk about some problems associated with moving by a canoe on standing and flowing water. Describing the behavior of the canoe in this conditions we depend on the basic concepts of classical mechanics. Maneuver of ferry gliding was used as an example how to exploit the river current to move successfully on flowing water. On the other way canoe stability problems are the base to show the need of usage the principles of statics to describe canoe equilibrium and understanding interaction of canoe with the environment. This study will help you understand how to efficiently and, what is the most important, safely and without unnecessary effort move by the canoe and admire the beauty which surrounds us.

Keywords: *force, canoe, ferry gliding, stability, balance, torque, stream, river, concentrated forces, center of buoyancy, critical angle, force couple, rowing, canoeing.*