

BIBLIOTEKA POLITECHNIKI  
WARSZAWSKIEJ  
Nr. Inwent. 411

KOMISJA WYDAWNICZA

TOWARZYSTWA BRATNIEJ POMOCY STUDENTÓW POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

PROF. IGNACY RADZISZEWSKI

# HYDRAULIKA

WEDŁUG WYKŁADÓW

NA WYDZIALE INŻYNIERII POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

Wydanie drugie



NR. 259

00371

W A R S Z A W A

1 9 3 7 R.

WYDANO WSPÓŁ Z KOŁEM INŻYNIERII I ADOWEJ  
STUDENTÓW POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

i.z. 3229



~~A.53.~~

C.10.53.



MP.44

BG02P/42A-12



## OD WYDAWCÓW.

Komisja Wydawnicza Tow. Bratniej Pomocy St. Politechniki Warszawskiej i Koło Inżynierii Lądowej St. Pol. Warszawskiej poczuwają się do miłego obowiązku, złożenia najserdeczniejszego podziękowania Panu Profesorowi I. Radziszewskiemu, za trudы poniesione przy poprawieniu i uzupełnieniu wydania pierwszego, oraz za okazaną pomoc przy wydawaniu niniejszego skryptu.

KOŁO INŻYNIERII LĄDOWEJ  
St. Pol. War.

KOMISJA WYDAWNICZA  
Tow. Br. Pom. St. Pol.W.

Warszawa w czerwcu 1937 roku.



## H Y D R A U L I K A.

1. Znajdujące się w przyrodzie ciała wystawiamy sobie złożonymi z drobnych cząstek; inaczej ciała uważamy jako układy cząstek.

Cząstki te mogą zachowywać się względem siebie w różny sposób, zależnie od natury ciała.

Jeśli cząstki danego ciała są tak ze sobą połączone, że przesunięcie jednych cząstek względem innych udaje się dopiero pod działaniem znacznie-szych sił, wówczas takie ciało nazywamy STAŁYM.

Ciało, utworzone z cząstek, bardzo łatwo-prawie bez oporu-przesuwających się jedne względem drugich, nazwiemy ciałem NIESTAŁYM lub PLYNEM.

2. Ciała stałe dzielimy na takie, których cząstki są ze sobą tak mocno powiązane, że wytwarzają bardzo wielki opór przy przesunięciu jednych cząstek względem drugich, i na takie, których czas-

tki - jedne względem drugich - zmieniają swe położenie pod działaniem sił zewnętrznych. Pierwszego rodzaju ciała stałe nazywamy SZTYWNYMI, ciała drugiego rodzaju nazywamy SPRĘŻYSTYMI.

3. Zaznaczyć tu należy, że ciała SZTYWNE, które by posiadały tę własność w doskonałości, w naturze nie istnieją; zakładamy tylko istnienie doskonale sztywnych ciał, gdyż takie założenie ułatwia nam poznanie wielu praw, rządzących ruchem i w ogóle zachowaniem się ciał rzeczywistych, poddanych działaniu sił zewnętrznych, jakkolwiek nie zupełnie sztywnych. Określeniem i formułowaniem tych praw zajmuje się MECHANIKA UKŁADÓW SZTYWNYCH.

4. Również nie znamy ciał stałych doskonale sprężystych; jeśli ciałem doskonale sprężystym nazwiemy takie ciało, które po odsunięciu sił zewnętrznych powraca ściśle do poprzedniej postaci, kiedy siły nie działały na ciało. Mimo to zakładamy istnienie ciał doskonale sprężystych; badamy prawa rządzące zmianami, zachodzącymi w takich ciałach. Zajmuje się tym m e c h a n i k a c i a ł s p r e ż y s t y c h; w zastosowaniu zaś do po-

trzeb technicznych i przy uwzględnieniu, że ciała rzeczywiste nie są doskonale sprężyste - nauka o wytrzymałości materiałów.

5. Jeśli przejdziemy do ciał niestałych, inaczej, płynów, będziemy mogli wyodrębnić dwa wyraźne rodzaje płynów. Jeden rodzaj stanowią będą te płyny, które pod działaniem sił ściskających prawie nie zmieniają objętości i drugi rodzaj - będą te płyny, które są bardzo ściśliwe, a które po ustaniu działania sił ściskających odzyskują pierwotną objętość. Pierwszy rodzaj płynów nazwiemy CIECZAMI, drugi - GAZAMI.

Prawa, określające zachowanie się cieczy, czy też gazu, pod działaniem sił zewnętrznych, są rozpatrywane w MECHANICE CIECZY, czy też GAZU. Mechanika cieczy, traktująca sprawę nie wyłącznie teoretycznie, lecz w zastosowaniu do zagadnień technicznych, nosi nazwę HYDRAULIKI.

Gazy w wielu przypadkach zachowują się podobnie jak ciecze; stąd też niektóre prawa, otrzymane w Hydraulice dla cieczy, znajdują zastosowanie z niewielkimi zresztą poprawkami - i dla gazów.

Badanie zachowania się gazów w innych ogólniejszych przypadkach wymaga uwzględnienia zjawisk cieplnych, co daje wyniki odmienne i bardziej złożone niż dla cieczy.

6. Nauka, którą w wykładzie niniejszym mamy rozwinąć, jest Hydraulika. Należy zatem bliżej poznać podstawowy przedmiot dalszych badań, to jest ciecz.

Rozpatrując szereg cieczy spotykanych w naturze, stwierdzamy wielką ich różnorodność i różne ich własności fizyczne. Badając bliżej różne ciecze przy jednych i tych samych warunkach, zauważymy, że zachowanie się tych cieczy będzie różne, zależne od ich właściwości. Uwzględnienie tych właściwości powoduje przy teoretycznych rozważaniach poważne trudności. Skutkiem tego postąpimy w taki sposób: wyobrażamy sobie ciecz o właściwościach fizycznych dość bliskich do właściwości tych cieczy rzeczywistych, z którymi najczęściej będziemy mieli do czynienia, a więc przede wszystkim z wodą. Pewne właściwości cieczy rzeczywistej nawet odrzucamy, aby tą drogą ułatwić sobie teoretyczne



badanie cieczy.

W ten sposób dochodzimy do badania w Mechanice Cieczy, czy też w Hydraulic, nie cieczy rzeczywistej, lecz t.zw. CIECZY DOSKONAŁEJ. Wyniki teoretyczne, otrzymane przy rozważaniu cieczy doskonałej, oczywiście będą się różniły od tego, co w naturze będziemy obserwowali; odchylenia będą tym większe, im bardziej właściwości cieczy rzeczywistej, mogące wpłynąć na badane zjawisko, odbiegają od właściwości, przypisywanych cieczy doskonałej.

Aby móc wyniki teoretyczne stosować do zagadnień praktycznych, wyniki te uzupełniamy współczynnikami odpowiednimi. Współczynniki wspomniane określamy na podstawie porównania wyników teoretycznych z wynikami badań laboratoryjnych lub z wynikami uzyskanymi z pomiarów w naturze.

7. Rozważmy ważniejsze własności fizyczne cieczy rzeczywistych i ustalmy, co nazwiemy c i e - c z ą d o s k o n a ł ą.

Ciecze są naogół mało ściśliwe; to znaczy, że trzeba zastosować bardzo znaczne siły, aby zmniej-

szyc daną objętość cieczy w sposób nieznaczny.

Naprz. woda o temperaturze  $0^{\circ}\text{C}$  przy zwiększaniu ciśnienia o 1 atmosferę zmniejsza objętość o 0,00005 pierwotnej objętości.

Woda o temperaturze  $20^{\circ}\text{C}$  przy takich samych warunkach zmniejsza objętość o 0,000044 pierwotnej objętości.

Woda o temperaturze  $100^{\circ}\text{C}$  o 0,000042.

Inaczej mówiąc, jeśli weźmiemy przy zwykłym ciśnieniu 1000 litrów wody o temperaturze  $0^{\circ}\text{C}$  i zwiększymy ciśnienie

do 5 atmosfer, wówczas otrzymamy objętość 999,8 lit.

do 10       "               "               "               "       999,5   "

do 20       "               "               "               "       999,0   "

do 30       "               "               "               "       998,5   "

Alkohol o  $14^{\circ}\text{C}$  zmniejsza objętość o 0,0001 przy zwiększeniu ciśnienia o 1 atmosferę.

Dla porównania warto przytoczyć dane o ściśliwości kilku ciał stałych:

Miedź zmienia swą objętość o 0,00000083 pierwotnej objętości przy zwiększeniu ciśnienia o 1 atmosferę;

mosiądz w tych samych warunkach	o 0,00000092,
ołów	o 0,0000027,
stal	o 0,00000066,
szkło	o 0,0000021.

Jak widzimy z powyższego, woda w warunkach zwykłych bardzo mało zmniejsza objętość nawet przy znacznych ciśnieniach.

Wobec tego możemy wpływu ciśnienia na objętość cieczy w bardzo wielu zagadnieniach zupełnie nie uwzględniać. Zakładamy zatem, że CIECZ DOSKONAŁA JEST ZUPEŁNIE NIEŚCIŚLIWA.

8. Ciecze wogóle odróżniają się od ciał stałych wielką ruchliwością, co się objawia tym, że dwie sąsiednie cząsteczki można przesunąć jedną względem drugiej przy użyciu bardzo małej siły. Różną ruchliwość rozmaitych cieczy tłumaczymy sobie różną lepkością cieczy. Lepkość powoduje to, że dwie cząstki sąsiednie, przesuwające się względem siebie w pewnej płaszczyźnie, doznają między sobą tarcia, które działa w płaszczyźnie ruchu, jako siła mająca kierunek przeciwny kierunkowi prędkości względnej. Tarcie to może powstawać nie tyl-

ko między dwiema cząstkami, dotykającymi się wzajemnie i poruszającymi się z różnymi prędkościami, lecz zachodzi między cząstkami cieczy, poruszającymi się tuż obok powierzchni ścianki naczynia lub przewodu. W pierwszym przypadku mamy do czynienia z TARCIEM WEWNĘTRZNYM, a w drugim zaś z TARCIEM ZEWNĘTRZNYM.

Sprawa tarcia wewnętrznego i zewnętrznego jest bardzo zawiła; uwzględnienie tarcia w rachunku natrafia na trudności matematyczne nie do rozwiązania. Dlatego też w celu ułatwienia badań decydujemy się na to, aby rozpatrywać ciecze *p o z b a w i o n e l e p k o ś c i*. Zakładamy zatem, że ciecz doskonała nie posiada lepkości.

9. Z natury samej lepkość cieczy pojawia się tylko wówczas, kiedy cząstki cieczy znajdują się w ruchu jedne względem drugich, albo względem ścianek naczynia. Kiedy zaś ciecz znajduje się w spoczynku, wówczas istnienie lepkości nie ma wpływu na zachowanie się cieczy.

Stąd łatwo wywnioskować, że prawa, otrzymane

dla cieczy doskonałej, znajdujące się w spoczynku, będą zupełnie ścisłe dla wszystkich cieczy nawet o znacznej lepkości.

W przypadku zaś ruchu cieczy lepkość odgrywa bardzo dużą rolę i nieraz znacznie zmienia wyniki, otrzymane dla cieczy doskonałej.

Jak stosować twierdzenia i wzory, otrzymane dla cieczy doskonałej, będącej w ruchu, a więc bez lepkości, jak te wzory uzupełniać, będzie o tym mowa niżej.

10. Przytoczymy niżej kilka liczb, wskazujących na różnorodność cieczy pod względem tarcia wewnętrznego /lepkość/, mierzonego w pewnych jednostkach  $\left/ \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2} \cdot \text{sek} \right/$ .

Woda o temp.  $0^{\circ}\text{C}$ . okazuje 0,0181 jednostek

"	"	$10^{\circ}\text{C}$ .	"	0,0133	"
"	"	$20^{\circ}\text{C}$ .	"	0,0102	"
"	"	$30^{\circ}\text{C}$ .	"	0,0081	"
"	"	$50^{\circ}\text{C}$ .	"	0,0057	"
rtęć	"	$0^{\circ}\text{C}$ .	"	0,0170	"
"	"	$99^{\circ}\text{C}$ .	"	0,0122	"

alkohol etylowy przy temp.  $0^{\circ}\text{C}$ . - 0,0185

alkohol etylowy	przy temp.	50°C.	- 0,0072
eter etylowy	" "	20°C.	- 0,0026
kwask siarkowy	" "	20°C.	- 0,2193
gliceryna	" "	2,8°C.	-42,2
"	" "	26,5°C.	- 4,9
smoła	" "	6°C.	-2200 x 10 <sup>6</sup>
"	" "	12°C.	- 250 x 10 <sup>6</sup>

-----

11. Wielka ruchliwość cząstek cieczy powoduje, że ciecz sama nie może zachować kształtów określonych, lecz przybiera kształt ciał stałych, z którymi się styka.

-----

12. Ciecze, jak i ciała stałe, pod wpływem temperatury zmieniają objętość, lecz też nieznacznie.

Naprz. 1000 litrów wody odmierzone przy temp. +4°C.  
 przy temp. 0°C zajmują objętość 1000,13 litrów  
 po nagrzaniu do 10°C. rozszerzą się do 1000,27 "  
 " " do 20°C. " " 1001,77 "  
 " " do 30°C. " " 1004,34 "  
 " " do 100°C. " " 1043,10 "

Inne ciecze również nieznacznie powiększają

objętość przy nagrzaniu.

Stąd możemy założyć, że badana przez nas ciecz doskonała NIE JEST WRAŻLIWA NA DZIAŁANIE TEMPERATURY, tym bardziej, że ciecz będzie badana przy niewielkich zmianach temperatury.

13. Na podstawie poprzedniego, to samo co powiedzieliśmy o objętości, powiemy o ciężarze właściwym różnych cieczy: że CIĘŻAR WŁAŚCIWY CIECZY DOSKONAŁEJ JEST STAŁY, niezależny od ciśnienia i temperatury.

Dla pamięci przytaczamy ciężary właściwe kilku ważniejszych cieczy:

Woda czysta /przy 4° C./	1 g/cm <sup>3</sup> , albo 1 kg/dm <sup>3</sup> , albo 1000 kg/m <sup>3</sup>
Woda morska	1,02 - 1,03 kg/dm <sup>3</sup> , albo 1020 - 1030 kg/m <sup>3</sup>
Nafta lub ropa	0,76 - 0,83 kg/dm <sup>3</sup> , albo 760 - 830 kg/m <sup>3</sup>
Benzyna	0,69 - 0,70 kg/dm <sup>3</sup> , albo 690 - 700 kg/m <sup>3</sup>
Gliceryna /18° C./	1,24 kg/dm <sup>3</sup> , albo 1240 kg/m <sup>3</sup>
Rtęć /15° C./	13,56 kg/dm <sup>3</sup> , albo 13560 kg/m <sup>3</sup>

Alkohol etylowy /100 %/

przy 10° C            0,80 kg/dm<sup>3</sup>, albo 800 kg/m<sup>3</sup>

-----

14. Ciecze nie okazują znaczniejszego oporu na rozrywanie i na ścinanie, gdyż siły przyciągania wzajemnego dwóch cząsteczek stykających się są bardzo małe. Opór przy rozrywaniu i ścinaniu cieczy powstaje raczej skutkiem lepkości, która w wielu cieczach jest nieznaczna.

Naprz.woda przy temp. 12° C. wykazuje wytrzymałość na rozrywanie 0.00037 kg/cm<sup>2</sup>, na ścinanie 0,000263 kg/cm<sup>2</sup>, kiedy żelazo ma 4000 kg/cm<sup>2</sup> i 2800 kg/cm<sup>2</sup>. Stąd możemy założyć, że CIECZ DOSKONAŁA NIE STAWIA ŻADNEGO OPORU PRZY ROZCIĄGANIU ANI PRZY ŚCINANIU.

15. Ponieważ niektóre twierdzenia, otrzymane w Hydraulic, znajdują zastosowanie i dla gazów, jak to było zauważone w art.5, przeto nie zawadzi w kilku słowach omówić właściwości GAZU DOSKONAŁEGO, z którym w obliczeniach będziemy mieli do czynienia oraz ważniejsze tu dla nas właściwości gazów rzeczywistych.

16. Przede wszystkim przyjmować będziemy, że



gaz doskonały jest doskona-  
le sprężysty, to znaczy, że objętość ga-  
zu doskonałego przy niezmienniej temperaturze jest  
stałe odwrotnie proporcjonalna do ciśnienia /pra-  
wo Boyle'a - Mariotte'a/. W rzeczywistości ten sto-  
sunek nie jest tak prosty; naprz. powietrze przy  
znaczniejszych ciśnieniach /powyżej 250 - 300 atmo-  
sfer/ powolniej zmniejsza objętość, niżby to wyni-  
kało z prawa Boyle'a - Mariotte'a.

17. Temperatura wpływa na stan gazu doskona-  
łego według prawa Gay - Lussac'a : o b j ę t o ś-  
c i g a z u p r z y s t a ł y m c i ś n i e-  
n i u s ą p r o p o r c j o n a l n e d o t e m-  
p e r a t u r b e z w z g l ę d n y c h . Przypo-  
minamy, że temperaturą bezwzględną nazywamy tempe-  
raturę, odczytaną ze skali, której zero znajduje  
się o  $273^{\circ}$  niżej normalnego 0 skali Celsjusza. W  
rzeczywistości ten stosunek też nie jest taki pro-  
sty; jednak wahania są nieznaczne.

18. Ciężar właściwy gazu doskonałego, podawa-  
ny zwykle w  $\text{kg/m}^3$  przy temperaturze  $0^{\circ}\text{C}$  i przy ciś-  
nieniu 1 atm. / $\approx 760 \text{ mm.sł.rt.}$ /, przy zmianie ciśnie-  
nia i temperatury zmieni się, gdyż objętość te-

go gazu zmieni się, a mianowicie:

Ciężar właściwy gazu doskonałego jest proporcjonalny do ciśnienia przy stałej temperaturze i odwrotnie proporcjonalny do temperatury bezwzględnej przy stałym ciśnieniu.

19. Poniżej przytaczamy kilka liczb, wskazujących ciężar właściwy gazów przy ciśnieniu = 760 mm. sł.rt.

	przy temp. 0° C.	przy temp. 15° C.
powietrze	1,293 kg/m <sup>3</sup>	1,188 kg/m <sup>3</sup>
tlen	1,429 "	1,312 "
azot	1,251 "	1,151 "
wodór	0,0899 "	0,0827 "
chlor	3,221 "	2,957 "
gaz świetlny	0,71-0,92	0,657 "

20. Gazy, podobnie jak ciecze, posiadają lepkość bardzo nieznaczną i znacznie mniejszą niż ciecze. Dlatego tym słuszniej możemy założyć, że GAZ DOSKONAŁY NIE POSIADA LEPKOŚCI.

Przytaczamy niżej kilka liczb, dotyczących lepkości kilku gazów:

Powietrze przy 0° C      0,000171  $\frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2} \cdot \text{sek}$

Powietrze przy	100° C.	-	0,000211	$\frac{dyn}{cm^2} \cdot sek$
Azot przy	0° C.	-	0,000165	„
" "	100° C.	-	0,000208	„
Tlen przy	0° C.	-	0,000187	„
" "	100° C.	-	0,000240	„
Para wodna przy	100° C.	-	0,000132	„
Wodór przy	0° C.	-	0,000086	„
" "	100° C.	-	0,000108	„

-----

21. Po zaznajomieniu się z fizycznymi własnościami cieczy doskonałej, którą będziemy badali, przejdziemy do właściwego wykładu. Dla ułatwienia poznania przedmiotu zazwyczaj wykład dzieli się na dwie części - na Hydrostatykę i Hydrodynamikę.

W HYDROSTATYCE rozważane są ciecze w stanie spoczynku bezwzględnego lub względnego, zaś

w HYDRODYNAMICE jest badany ruch cieczy.

Zamiast jednak zajmowania się Hydrodynamiką, która jest właściwie przedmiotem czysto teoretycznym, zajmiemy się t.zw. H y d r a u l i k ą , którą rozumiemy jako naukę stosowaną, badającą zjawiska

hydrodynamiczne, zachodzące z cieczami rzeczywistymi, przy zastosowaniu współczynników praktycznych.

## H Y D R O S T A T Y K A.

22. Zasadnicze pojęcie, z którym stale będziemy się spotykać w hydrostatyce, jest t.zw. CIŚNIENIE HYDROSTATYCZNE. Wystawmy sobie płyn /ciecz lub gaz/, zawarty w naczyniu. Niech płyn będzie w równowadze. Nic się w równowadze płynu nie zmieni, jeśli pomysłimy wewnątrz tego płynu, dowolną powierzchnię  $F$  / zamkniętą /. Przypuśćmy, że część płynu, znajdującą się na zewnątrz powierzchni, odrzucimy, zastępując w każdym elemencie tej powierzchni działaniem odrzuconego płynu odpowiednimi siłami. Po takiej zamianie równowaga płynu nie zostanie naruszona.

Weźmy teraz w którymkolwiek miejscu powierzchni  $F$  punkt  $M$ , a wokół niego mały element powierzchni, naprz.  $\Delta F$ . Na ten element niech przypada siła  $\Delta P$ . Jeśli element  $\Delta F$  jest dostatecznie mały, wówczas przyjąć możemy, że we wszystkich punktach tego elementu działania są jednakowe.