Piotr Sobczyk

Hydraulika siłowa

Zbiór zadań z rozwiązaniami

PWN

Moim Rodzicom i Kasi

Projekt okładki i stron tytułowych **Przemysław Spiechowski**

Ilustracja na okładce **Frank L. Junior / Shutterstock**

Wydawca **Adam Filutowski**

Koordynator ds. redakcji **Renata Ziółkowska**

Redaktor **Mieczysława Kompanowska**

Produkcja **Mariola Grzywacka**

Łamanie **Ewa Szelatyńska, ScanSystem.pl**

Książka, którą nabyłeś, jest dziełem twórcy i wydawcy. Prosimy, abyś przestrzegał praw, jakie im przysługują. Jej zawartość możesz udostępnić nieodpłatnie osobom bliskim lub osobiście znanym. Ale nie publikuj jej w internecie. Jeśli cytujesz jej fragmenty, nie zmieniaj ich treści i koniecznie zaznacz, czyje to dzieło. A kopiując jej część, rób to jedynie na użytek osobisty.

Szanujmy cudzą własność i prawo.
Więcej na www.legalnakultura.pl
Polska Izba Książki

Copyright © by Wydawnictwo Naukowe PWN SA
Warszawa 2015

ISBN: 978-83-01-18283-0

Wydanie I

Wydawnictwo Naukowe PWN SA
02-460 Warszawa, ul. Gottlieba Daimlera 2
tel. 22 69 54 321; faks 22 69 54 288
Infolinia 801 33 33 88
e-mail: pwn@pwn.com.pl; www.pwn.pl

Druk i oprawa: OSDW Azymut Sp. z o.o.

Spis treści

Od Autora VII

Podziękowania VIII

Indeks ważniejszych oznaczeń IX

1. Pojęcia podstawowe – gęstość, ciśnienie hydrostatyczne, siła i ciśnienie, jednostki, energia, moc, praca 1

Odpowiedzi 4
Rozwiązania 5

2. Lepkość, dobór średnicy przepływu, prędkość cieczy, przecieki i opory 12

Odpowiedzi 17
Rozwiązania 17

3. Siłowniki – prędkość wysuwu, dobór średnicy, przecieki wewnętrzne, współczynnik sprężystości objętościowej, siłowniki specjalne 29

Odpowiedzi 37
Rozwiązania 37

4. Pompy. Dobór, sprawność, moc mechaniczna i hydrauliczna, stała i zmienna wydajność, umiejscowienie 52

Odpowiedzi 56
Rozwiązania 56

5. Zawory. Zawory sterujące ciśnieniem, zawory sterujące natężeniem przepływu, łączenie zaworów dławiących, obliczanie ustawień zaworów, siły hydrodynamiczne 64

Odpowiedzi 67
Rozwiązania 68

6. Silniki hydrauliczne 79

Odpowiedzi 81
Rozwiązania 82

7. Akcesoria – zbiorniki, chłodnice, filtry, akumulatory 87

Odpowiedzi 93
Rozwiązania 93

8. Układy 105
Odpowiedzi 116
Rozwiązania 116

9. Sprawność układów 131
Odpowiedzi 136
Rozwiązania 136

10. Zadanie projektowe 148
Zadanie 150
Rozwiązanie 152

Wzory 161

Załącznik 1 166

Załącznik 2 167

Załącznik 3 168

Załącznik 4 171

Literatura 172

Od autora

Przekazuję Państwu książkę, której celem jest pomoc w zrozumieniu lub przypomnieniu podstaw hydrostatyki, zwanej również hydrauliką siłową.

Książka koncentruje się na podstawach hydrostatyki i jest napisana prostym językiem, co ma na celu zwiększenie jej przystępności. Podczas pracy w roli nauczyciela akademickiego zauważyłem, że to problemy w zrozumieniu podstawowych i – jak by się mogło wydawać – oczywistych zagadnień często stoją na przeszkodzie w zrozumieniu zasad działania układów hydrostatycznych.

Adresatami publikacji są studenci kierunków, których programy studiów przewidują przedmioty związane z hydrostatyką. Książka ma im pomóc zrozumieć podstawy hydrauliki siłowej oraz zachęcić (a nie zniechęcić) do dalszej nauki i pogłębiania wiedzy w tej fascynującej dziedzinie. Adresuję ją także do inżynierów, którzy w swojej codziennej pracy rzadko mają do czynienia z dyscypliną, jaką jest hydraulika siłowa, ale chcieliby przypomnieć sobie jej zasadnicze zagadnienia oraz sposób prowadzenia podstawowych obliczeń.

Do każdego zadania zamieściłem odpowiedź oraz rozwiązanie, które w sposób skrótowy wyjaśnia tok rozumowania prowadzący do uzyskania wyniku. Ma to umożliwić indywidualną naukę przy rozwiązywaniu zadań. Ze względu na formułę oraz objętość książki nie było możliwe pełne opisanie każdego z zagadnień teoretycznych. Rozwiązania mają być jedynie podpowiedzią i pomocą w chwili zwątpienia, nie mają jednak na celu zastąpienia podręcznika teoretycznego.

Na końcu książki znajdują się materiały pomocnicze oraz wzory, razem z przykładem zadania, w którym dany wzór został użyty.

W przypadku trudności z rozwiązaniem któregoś z zadań lub ewentualnych wątpliwości możliwy jest kontakt z autorem: hydrostatyka.zadania@gmail.com

Podziękowania

Dziękuję wszystkim osobom, które miały swój wkład w powstanie tej książki.

Osobą, bez której udziału książka ta z pewnością by nie powstała, jest prof. Karl-Erik Rydberg z Linkopings Universitet. Dziękuję mu za zaufanie, przekazanie bezcennej wiedzy oraz możliwość współpracy, podczas której pojawił się pomysł na niniejszą książkę. Dziękuję także za pomoc w opracowaniu zakresu książki i udostępnienie mi materiałów, z których korzystałem przy pisaniu książki.

Chciałbym również podziękować dr. inż. Markowi Łutowiczowi z Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni, dr. inż. Leszkowi Osieckiemu z Politechniki Gdańskiej, prof. Zenonowi Jędrzykiewiczowi oraz dr. Jerzemu Stojkowi z Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie za pomoc w określeniu zakresu materiału zawartego w książce oraz za ich sugestie i propozycje dotyczące zadań.

Dziękuję firmie Parker Hannifin za zgodę na wykorzystanie w książce materiałów pomocniczych oraz pomoc w wydaniu książki. W szczególności dziękuję Panu Radosławowi Budziarzowi oraz Panu Mirosławowi Wójcikowi.

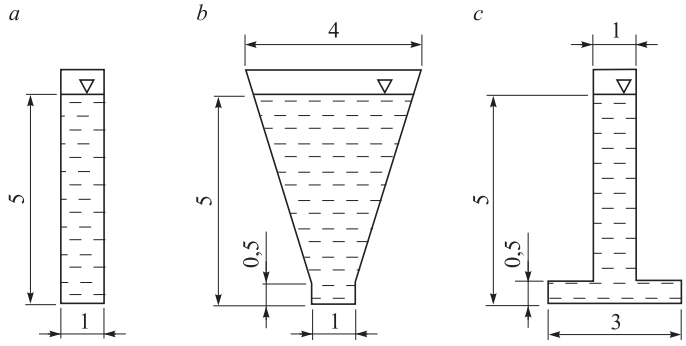
Dziękuję bardzo Pani Katarzynie Włodarczyk i Panu Adamowi Filutowskiemu z wydawnictwa PWN za ich cierpliwość oraz przeprowadzenie mnie przez proces wydawniczy. Dziękuję również Paniom Mieczysławie Kompanowskiej oraz Katarzynie Soboń za redakcję tekstu.

Na końcu chciałbym podziękować dr Katarzynie Kwaśnej za pomoc w pracy nad książką, motywację do pracy oraz za jej codzienne wsparcie.

1

Pojęcia podstawowe – gęstość, ciśnienie hydrostatyczne, siła i ciśnienie, jednostki, energia, moc, praca

1.1. Na rysunku 1.1 przedstawiono trzy zbiorniki wypełnione tym samym olejem do podanej wysokości. Zbiorniki te są odkryte, a na powierzchnię oleju działa ciśnienie atmosferyczne p_a = 1013 hPa. Temperatura powietrza wynosi 23°C. Wymiary zbiorników (w metrach) zostały przedstawione na rysunku. W którym zbiorniku ciśnienie cieczy przy dnie będzie najwyższe?

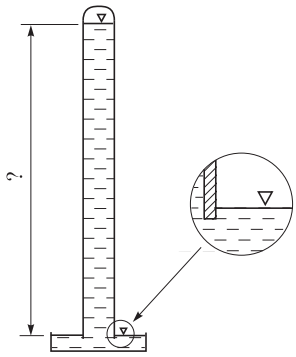


Rys. 1.1.

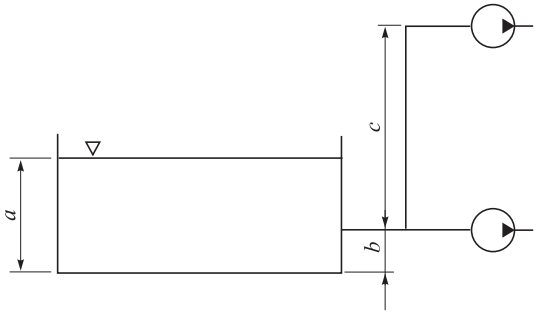
1.2. Oblicz ciśnienie względne panujące na dnie zbiorników (rys. 1.1*a*, *b* i *c*), jeżeli wypełnione są odpowiednio wodą (ρ_a = 1000 kg/m^3, h_a = 2 m), olejem (ρ_b = 870 kg/m^3, h_b = 2 m), benzyną (ρ_c = 700 kg/m^3, h_a = 2 m).

1.3. Oblicz wysokość słupa wody (o gęstości ρ = 1000 kg/m^3) w zbiorniku przedstawionym na rysunku 1.2.
Zbiornik jest szczelnie zamknięty od góry. Ponad powierzchnią cieczy w zbiorniku znajduje się próżnia. Natomiast jego dolna część jest otwarta i zanurzona w cieczy, która ma bezpośredni kontakt z atmosferą (pod ciśnieniem p_a = 1013 hPa).

1.4. Na rysunku 1.3 przedstawiono zbiornik oleju, do którego są przyłączone dwie pompy. Ze względu na brak miejsca jedną z pomp umieszczono ponad zbiornikiem. Oblicz (względne oraz bezwzględne) ciśnienia hydrostatyczne oleju u wlotu do obu



Rys. 1.2.



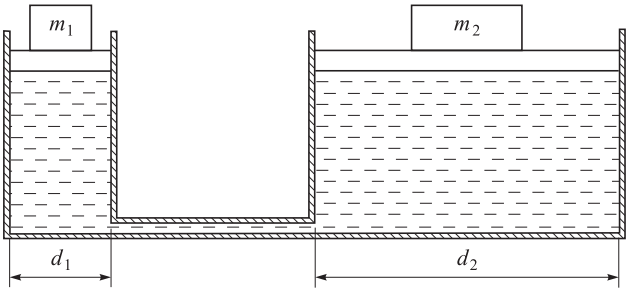
Rys. 1.3.

pomp. Pomiń opory przepływu w rurach prowadzących do pomp. Szczegółowe dane: gęstość oleju ρ = 870 kg/m^3, ciśnienie atm. p_a = 1013 hPa, wymiary: a = 1 m, b = 0,5 m, c = 4,5 m, lepkość oleju υ = 32 cSt.

1.5. Właściciel motocykla posiada manometr wyskalowany w MPa. Instrukcja obsługi motocykla podaje, że tylne koło tego pojazdu powinno być napompowane do ciśnienia p = 2,5 bar. Jaką wartość wskaże manometr przy właściwym ciśnieniu powietrza w tylnym kole?

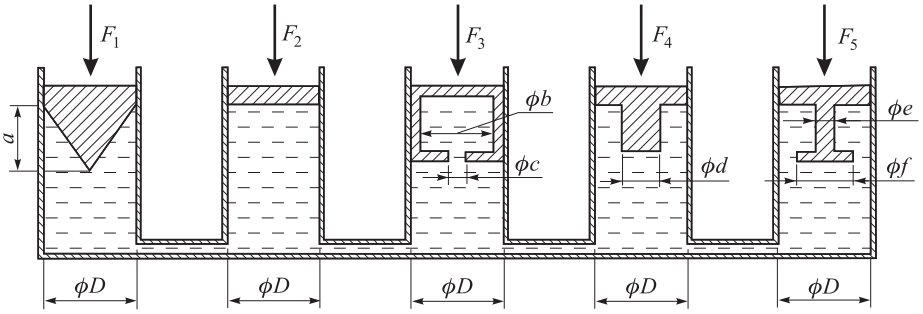
1.6. Przelicz podane wielkości na odpowiadające im wartości w Pa, m, m/s, m^3/s, m^2, m^3:
p = 245 bar, V_1 = 32 l, b = 13 mm, V_2 = 2000 cm^3, v = 23 km/h, Q_1 = 67 l/min, A = 1300 mm^2, Q_2 = 120 dm^3/min.

1.7. Na rysunku 1.4 przedstawiono dwa siłowniki hydrauliczne. Dolne komory obu siłowników są wypełnione olejem i połączone ze sobą przewodem hydraulicznym. Dzięki temu olej może pomiędzy nimi swobodnie przepływać. Siłowniki są obciążone ładunkami o masach m_1 = 1000 kg i m_2 = 4000 kg. Średnice tłoków wynoszą odpowiednio d_1 = 50 mm oraz d_2 = 100 mm. Ciśnienie atmosferyczne P_a = 1013 hPa. Tłoki siłowników pozostają w spoczynku. Pomiń straty (przecieki, tarcie).
W którym siłowniku będzie wyższe ciśnienie?



Rys. 1.4.

1.8. Na rysunku 1.5 przedstawiono siłowniki hydrauliczne z różnie ukształtowanymi tłokami. Ciśnienie oleju we wszystkich siłownikach jest identyczne. Tłoki pozostają w spoczynku i są obciążone siłami F. Która z sił F ma największą wartość? Wymiary: $D = 100$ mm, $d = 50$ mm, $a = 80$ mm, $b = 80$ mm, $c = 20$ mm, $e = 10$ mm, $f = 70$ mm.

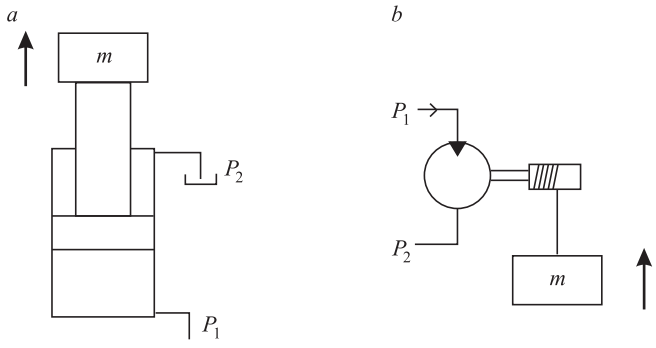


Rys. 1.5.

1.9. Zbiornik oleju pewnego systemu hydraulicznego ma kształt prostopadłościanu o wymiarach podstawy 50×50 oraz wysokości 60 cm. Przed uruchomieniem systemu zbiornik należy napełnić olejem o gęstości $\rho = 870$ kg/m^3 i lepkości $\upsilon = 42$ cSt do wysokości $h = 450$ mm (od dna zbiornika). Ciśnienie atmosferyczne $p_a = 1013$ hPa.

a) Oblicz potrzebną objętość oleju w litrach.
b) Oblicz masę oleju, który znajdzie się w zbiorniku.

1.10. Siłownik hydrauliczny przedstawiony na rys. 1.6*a* ma unieść ciężar o masie $m = 250$ kg, z jednostajną prędkością $v = 0{,}2$ m/s na wysokość $h = 3$ m.
Ciśnienie $p_1 = 100$ bar, ciśnienie $p_2 = 0$ (względne).



Rys. 1.6.

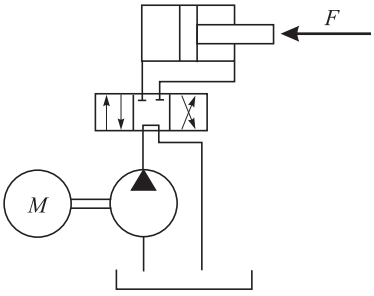
a) Oblicz moc potrzebną do wykonania tej operacji (pomijając straty).
b) Jaką pracę wykona siłownik przy uniesieniu ciężaru na wysokość h?

1.11. Silnik hydrauliczny jest sprzężony z bębnem wciągarki używanej do wciągania ładunku o masie $m = 250$ kg z jednostajną prędkością $v = 0{,}2$ m/s (rys. 1.6*b*).

a) Jaką moc musi oddawać silnik hydrauliczny (pomijając straty), aby unieść ładunek z taką prędkością? Średnica bębna wciągarki $d = 120$ mm, moment bezwładności bębna $I = 0{,}0486\ \mathrm{kg \cdot m^2}$, ciśnienie oleju w układzie $p = 153$ bar.

b) Ile energii należy zużyć, aby unieść ładunek cztery razy na wysokość $h = 3$ m?

1.12. Na rysunku 1.7 przedstawiono uproszczony schemat hydrauliczny łuparki do drewna. Mechanizm działania łuparki polega na wysuwaniu tłoczyska siłownika hydraulicznego, które dociska drewno do ostrza. W zależności od kształtu ostrza klocek drewna pęka na dwie lub więcej części.



Rys. 1.7.

a) Jaka musi być minimalna moc silnika elektrycznego (pomijając wszelkie straty), aby drewno było łupane z naciskiem równym maks. 1,2 t, na odcinku $s = 300$ mm, w czasie $t = 6$ s? Założenia dotyczące układu hydraulicznego: ciśnienie oleju $p_{\max} = 150$ bar, jeden siłownik o średnicy roboczej $d = 50$ mm, lepkość oleju $\upsilon = 32$ cSt.

b) Oblicz potrzebną minimalną moc wejściową, gdy sprawność całkowita układu wynosi 70%.

Odpowiedzi:

1.1. Ciśnienia są jednakowe
1.2. $p_a = 19{,}6$ kPa, $p_b = 17$ kPa, $p_c = 13{,}7$ kPa
1.3. $h = 10{,}3$ m
1.4. $p_{\text{dolna}} = 105{,}5$ kPa, $p_{\text{górna}} = 67{,}1$ kPa
1.5. 0,25 MPa
1.6. $p = 24{,}5$ MPa, $v = 6{,}38$ m/s, $V_1 = 0{,}032\ \mathrm{m^3}$, $V_2 = 0{,}002\ \mathrm{m^3}$, $Q_1 = 0{,}001117\ \mathrm{m^3/s}$, $Q_2 = 0{,}002\ \mathrm{m^3/s}$, $b = 0{,}013$ m, $A = 0{,}0013\ \mathrm{m^2}$
1.7. Jednakowe
1.8. Jednakowe

1.9. a) $V = 112{,}5$ l; b) $m = 97{,}9$ kg
1.10. a) $P = 490$ W; b) $W = 7357$ J
1.11. Tak jak w zad. 1.12
1.12. a) 588 W; b) 840 W

Rozwiązania:

1.1. Ciśnienie hydrostatyczne p jest wywołane naciskiem słupa cieczy. Ciśnienie to jest zależne od wysokości słupa cieczy h nad wybranym punktem, gęstości cieczy ρ i przyspieszenia ziemskiego g oddziałującego na ciecz (grawitacji).

$$p = h \cdot \rho \cdot g$$

$$[p] = \mathrm{m} \cdot \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2} = \frac{1}{\mathrm{m}^2} \cdot \frac{\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}}{\mathrm{s}^2} = \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}^2} = \mathrm{Pa}$$

Jak widać, przy jednakowej gęstości cieczy we wszystkich zbiornikach ciśnienie hydrostatyczne na dnie zbiornika zależy jedynie od wysokości słupa tej cieczy. Nie zależy ono od ilości (objętości) cieczy znajdującej się ponad dnem zbiornika ani od kształtu zbiornika (wielkości powierzchni lustra cieczy, powierzchni dna).

1.2. Wysokość h jest jednakowa we wszystkich trzech przypadkach, tak samo jak przyspieszenie ziemskie g. Zmienia się jedynie gęstość cieczy. Korzystając ze wzoru użytego w zad. 1.1, obliczamy kolejno:

$$p_a = 2 \cdot 1000 \cdot 9{,}81 = 19620 \text{ Pa} = 19{,}6 \text{ kPa}$$

$$p_b = 2 \cdot 870 \cdot 9{,}81 = 17069 \text{ Pa} = 17 \text{ kPa}$$

$$p_c = 2 \cdot 700 \cdot 9{,}81 = 13734 \text{ Pa} = 13{,}7 \text{ kPa}$$

Są to ciśnienia względne, a więc mierzone względem ciśnienia otoczenia (w tym przypadku ciśnienia atmosferycznego, które przyjmujemy jako równe zeru). W obliczeniach układów hydraulicznych najczęściej przyjmujemy ciśnienie atmosferyczne równe zeru.

By obliczyć ciśnienie bezwzględne (względem próżni), należałoby dodać do wyników wartość ciśnienia atmosferycznego oddziałującego na powierzchnię cieczy.

1.3. W poprzednich zadaniach zbiorniki były odkryte. Na powierzchnię cieczy w zbiorniku oddziaływało ciśnienie atmosferyczne powietrza. W tym przypadku zbiornik jest szczelnie zamknięty od góry, a przestrzeń nad powierzchnią cieczy wypełnia próżnia. Wiemy, że panujące tam ciśnienie bezwzględne wynosi zero, natomiast bezwzględne ciśnienie atmosferyczne na zewnątrz zbiornika 1013 hPa.

Zbiornik jest od spodu otwarty i płytko zanurzony w cieczy (patrz rys. 1.2). Ciecz ze zbiornika nie wypływa, lecz tworzy słup o pewnej wysokości h. Dzieje się tak, ponieważ ciśnienie atmosferyczne oddziałuje na powierzchnię cieczy otaczającą podstawę

zbiornika i „wciska” ciecz do zbiornika przez otwarte dno. Tak samo jak popijane przez słomkę napoje.

Ciśnienie wewnątrz zbiornika (próżnia) ma względem ciśnienia atmosferycznego wartość ujemną równą −1013 hPa (ciśnienie względne), dlatego nazywane jest podciśnieniem.

Naszym zadaniem jest znalezienie wysokości słupa cieczy h (odległości pomiędzy powierzchnią cieczy wewnątrz zbiornika a powierzchnią cieczy otaczającej zbiornik).

Wiemy już, że ciśnienie hydrostatyczne zależy między innymi od wysokości słupa cieczy. W tym przypadku znamy ciśnienie hydrostatyczne p u wlotu do zbiornika (musi być ono równe ciśnieniu atmosferycznemu) oraz na powierzchni cieczy wewnątrz zbiornika (wynosi zero).

Korzystając ze wzoru z zad. 1.1, obliczamy wysokość słupa cieczy:

$$h = \frac{p}{\rho \cdot g}$$

$$h = \frac{101300}{1000 \cdot 9{,}81} = 10{,}3 \text{ m}$$

Warto zapamiętać!

Ciśnienie atmosferyczne (podciśnienie w zbiorniku) jest w stanie wytworzyć słup wody o wysokości ok. 10 m. Oznacza to, że wytwarzając próżnię, można zassać wodę (np. ze studni) właśnie do wysokości 10 m. Przy większych różnicach poziomów konieczne są inne rozwiązania.

1.4. Ciśnienia u wlotów do obu pomp zależą od ich położenia względem powierzchni oleju w zbiorniku. Ten poziom przyjmujemy jako poziom zerowy (obliczamy ciśnienie względne). Im niżej pod powierzchnią znajdzie się pompa, tym wyższe ciśnienie, wysokość słupa cieczy będzie rosnąć. Odwrotnie, im wyższe położenie pompy, tym ciśnienie będzie niższe, ponieważ wysokość słupa cieczy maleje. Ponad powierzchnią zbiornika ma wartość ujemną (względem ciśnienia atmosferycznego).

Korzystając z danych przedstawionych na rysunku 1.3, obliczamy te odległości dla obu pomp:

$$h_1 = a - b = 1 - 0{,}5 = 0{,}5 \text{ m}, \qquad \text{dla pompy dolnej.}$$

$$h_2 = (a - b) - c = (1 - 0{,}5) - 4{,}5 = -4 \text{ m}, \qquad \text{dla pompy górnej.}$$

Ciśnienie hydrostatyczne powstałe na skutek oddziaływania słupa cieczy:

$$p_1 = h_1 \cdot \rho \cdot g, \qquad \text{dla pompy dolnej.}$$

$$p_2 = h_2 \cdot \rho \cdot g, \qquad \text{dla pompy górnej.}$$

Ciśnienia bezwzględne (absolutne) u wlotu do obu pomp to suma ciśnienia atmosferycznego p_a oddziałującego na olej w zbiorniku oraz ciśnienia hydrostatycznego (odpo-

wiednio p_1 oraz p_2) powstałego na skutek różnicy poziomów pomiędzy powierzchnią oleju a pompami:

$$p_{b1} = p_a + p_1 = 105{,}5 \text{ kPa} \approx 1{,}05 \text{ bar}, \quad \text{dla pompy dolnej.}$$

$$p_{b2} = p_a + p_2 = 67{,}1 \text{ kPa} \approx 0{,}67 \text{ bar}, \quad \text{dla pompy górnej.}$$

Ciśnienie panujące u wlotu do pompy jest mniejsze od ciśnienia atmosferycznego. Wiele pomp ma określone minimalne ciśnienie oleju u wlotu, np. 0,8 bar. W tym przypadku ciśnienie byłoby za niskie, nawet przy zerowych stratach ciśnienia powodowanych przez przepływ oleju. Najprawdopodobniej doprowadziłoby to do kawitacji i zniszczenia pompy. W rzeczywistości należy wziąć pod uwagę również spadki ciśnienia oleju w przewodzie ssawnym pompy, co dodatkowo pogarsza sytuację.

Warto zapamiętać!

Niewłaściwe położenie pompy względem zbiornika może spowodować poważne konsekwencje w funkcjonowaniu układu.

1.5. Ciśnienie 2,5 bar, wyrażone w MPa będzie w przybliżeniu równe: 0,25 MPa.

1.6. Dane obliczeniowe bardzo często nie są podane w jednostkach podstawowych układu SI. Dlatego należy być ostrożnym i zawsze sprawdzać, czy wartość użyta do obliczeń jest podana we właściwych jednostkach.

Ciśnienie:

Bar nie należy do jednostek SI, ale jest powszechnie stosowany w katalogach komponentów hydrauliki siłowej, obliczeniach i na manometrach.

$$245 \text{ bar} \approx 24{,}5 \text{ MPa}$$

Warto zapamiętać! 1 bar ≈ 100 kPa

Prędkość:

Ponieważ jesteśmy przyzwyczajeni do określania prędkości w km/h, prędkość podana w tych jednostkach jest dla nas łatwiejsza do wyobrażenia. Należy jednak pamiętać o właściwych jednostkach użytych w obliczeniach.

$$1 \text{ km} = 1000 \text{ m}, \quad 1 \text{ h} = 3600 \text{ s},$$

$$x\frac{\text{km}}{\text{h}} = x \cdot \frac{1000}{3600}\frac{\text{m}}{\text{s}} = x \cdot \frac{1}{3{,}6}\frac{\text{m}}{\text{s}}, \quad y\frac{\text{m}}{\text{s}} = y \cdot 3{,}6\frac{\text{km}}{\text{h}}$$

$$23 \text{ km/h} = 6{,}38 \text{ m/s}$$

Warto zapamiętać! 10 km/h ≈ 3 m/s

Natężenie przepływu:

Natężenie przepływu najczęściej podaje się w litrach na minutę (l/min), a nie w metrach sześciennych na sekundę (m^3/s). Podobnie jak w poprzednich przykładach należy pamiętać, aby nie stosować tych wartości bezmyślnie.

$$1\ \mathrm{l} = 0{,}001\ \mathrm{m}^3, \quad 1\ \mathrm{min} = 60\ \mathrm{s}, \quad x\ \frac{1}{\mathrm{min}} = x \cdot \frac{0{,}001}{60}\ \frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{s}} = \frac{x}{60000}\ \frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{s}}$$

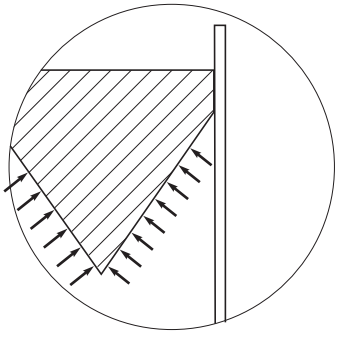
$$67\ \mathrm{l/min} = 0{,}001117\ \mathrm{m}^3/\mathrm{s}$$

1.7. Ponieważ siłowniki pozostają w spoczynku, a ich komory robocze są ze sobą połączone, ciśnienie w nich musi mieć jednakową wartość.

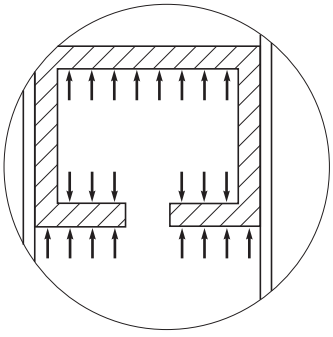
1.8. Ponieważ średnice siłowników i ciśnienia oleju p są jednakowe, również siły F są jednakowe. Kształt tłoka nie ma znaczenia, liczy się jedynie powierzchnia robocza jego przekroju A.

$$F = p \cdot A$$

Kształt tłoka 1 może sprawiać wrażenie, że wartość siły F_1 jest inna od wartości siły F_2. Ciśnienie oddziałuje na tłok prostopadle do jego ścianek, a więc w tym przypadku nie pionowo i w górę (w kierunku działania siły), lecz pod kątem, do wnętrza tłoka (rys. 1.8). Jednak po obliczeniu powierzchni stożka i składowej działającej prostopadle w kierunku ruchu otrzymamy siłę F_1 równą sile F_2.



Rys. 1.8.



Rys. 1.9.

Podobnie w przypadku tłoka 3. Tu olej znajduje się wewnątrz tłoka i oddziałuje na jego dno w kierunku przeciwnym do siły F_3. Jednak olej pod tłokiem oddziałuje na jednakową powierzchnię z takim samym ciśnieniem i przeciwnym zwrotem (rys. 1.9). Przez co, również w tym przypadku (jak też w pozostałych), kształt tłoka nie zmienia wartości siły F_3.

1.9. a) Objętość oleju będzie równa objętości części zbiornika wypełnionej przez olej. Jej wymiary to $50 \times 50 \times 45$ cm. Dlatego objętość oleju jest równa 112,5 l.

b) Znając gęstość oleju i jego objętość, obliczamy masę oleju w zbiorniku.

$$m = \rho \cdot V = 870 \cdot 0{,}1125 = 97{,}9 \text{ kg}$$

1.10. a) Moc to prędkość wykonywania pracy. Podczas unoszenia ładunku pracę wykonuje siła równa ciężarowi ładunku (pomijamy straty i zakładamy stałą wartość siły).

$$P = F \cdot v$$

$$P = m \cdot g \cdot v = 490 \text{ W}$$

$$[P] = \text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^3} = \frac{\text{J}}{\text{s}} = \text{W}$$

Taką moc musi dostarczyć układ hydrauliczny do ładunku, aby go unieść. Szczegóły budowy układu nie mają wpływu na moc niezbędną do uniesienia ładunku. Zależy ona od samego ładunku i parametrów jego podnoszenia. Natomiast moc dostarczona do układu hydraulicznego zależy już od jego budowy i generowanych w nim strat.

b) Praca wykonana przy podnoszeniu ładunku z siłą F na wysokość h:

$$W = F \cdot h = m \cdot g \cdot h = 7357 \text{ J}.$$

1.11. a) W tym przypadku mamy do czynienia z ruchem obrotowym. Praca wykonywana jest przez moment obrotowy dostarczany przez silnik hydrauliczny. Wielkość momentu zależy od siły i ramienia, na jakim ta siła oddziałuje na wał silnika (promień bębna wciągarki r).

$$M = m \cdot g \cdot r$$

Praca jest wykonywana z prędkością kątową ω równą prędkości kątowej wału silnika hydraulicznego i bębna wciągarki. Istnieje związek pomiędzy prędkością kątową wciągarki a prędkością liniową, z jaką wciągana jest lina.

$$\omega = \frac{v}{r}$$

Korzystamy ze wzoru na moc w ruchu obrotowym jednostajnym:

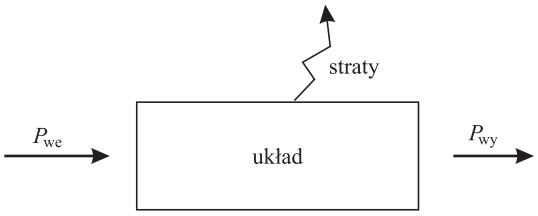
$$P = M \cdot \omega = m \cdot g \cdot r \cdot \frac{v}{r} = m \cdot g \cdot v$$

b) Energia zużyta przy podniesieniu ładunku będzie równa energii potencjalnej, jaką nabędzie ładunek.

$$E = m \cdot g \cdot h$$

Ponieważ masa ładunku, wysokość i prędkość podnoszenia są identyczne jak w zad. 1.10, również niezbędna moc oraz wykonana praca muszą odpowiadać tym obliczonym w zad. 1.10 (pomijamy wszelkie straty).

1.12. By wyznaczyć moc P_{we}, którą silnik elektryczny dostarczy do układu, musimy poznać moc P_{wy} dostarczaną przez układ do obciążenia oraz straty powstałe po drodze (patrz rys. 1.10). Układ nie może pobrać mocy większej od swojego zapotrzebowania.



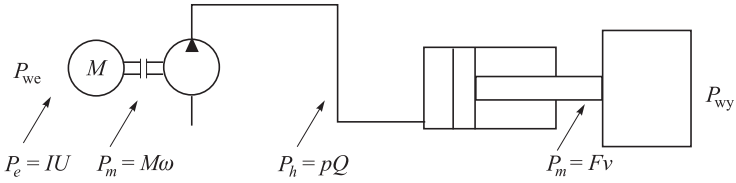
Rys. 1.10.

Dlatego przy wstępnym określeniu zapotrzebowania na moc i założeniu zerowych strat w układzie hydraulicznym szczegóły budowy i wielkości elementów układu hydraulicznego nie mają znaczenia. To obciążenie układu i moc dostarczana przez układ do tego obciążenia determinują moc dostarczaną do układu. Moc dostarczana do układu nie znika. Przybiera jedynie inną postać i jest przenoszona przez układ lub tracona na skutek strat w poszczególnych elementach układu (rys. 1.11).

Moc wejściowa P_{we} dostarczana jest do układu w formie energii elektrycznej:

– P_e to moc elektryczna dostarczana do silnika elektrycznego;
– pomiędzy silnikiem a pompą znajduje się wał, który przekazuje moc mechaniczną P_m od silnika do pompy;
– pompa przekształca energię mechaniczną w energię hydrauliczną; moc z pompy dostarczana jest do siłownika właśnie w postaci mocy hydraulicznej P_h;
– w siłowniku energia hydrauliczna jest zamieniana z powrotem w energię mechaniczną P_m.

Moc wyjściowa P_{wy} z układu to moc mechaniczna siłownika P_m. Jeżeli zakładamy brak strat, jest ona równa mocy wejściowej P_{we}.



Rys. 1.11.

Załóżmy, że układ przesuwa pewien element z mocą równą 5 kW, a moc tracona w układzie hydraulicznym to 1 kW. Napędzanie układu (pompy) silnikiem elektrycznym o mocy 2 kW nie zda egzaminu, ponieważ obciążenie tego silnika będzie za duże. Natomiast użycie silnika elektrycznego o mocy 15 kW nie oznacza, że taką moc będzie on oddawał do układu. Odda dokładnie tyle, ile będzie potrzebował nasz układ (5 kW + 1 kW). Czyli taki silnik byłby przewymiarowany dla naszego układu i jego użycie byłoby nieekonomiczne, ponieważ odda jedynie małą część swojej mocy nominalnej.

a) Jak wspomniano, przy założeniu zerowych strat w układzie hydraulicznym moc wejściowa P_{we} do układu będzie równa mocy wyjściowej P_{wy}. Dlatego szczegóły budowy

układu hydraulicznego nie są konieczne do jej wyznaczenia. Moc będzie jedynie zmieniać swą postać, natomiast jej wartość pozostanie stała.

$$P_{we} = P_e = P_m = P_h = P_m = P_{wy}$$

Poszukiwana moc silnika elektrycznego musi być co najmniej równa mocy mechanicznej potrzebnej do rozłupania drewna przy podanych w zadaniu założeniach. Możemy ją łatwo obliczyć, znając siłę F i prędkość v, z jaką rozłupywane będzie drewno: $P_{wy} = F \cdot v = F \cdot \frac{s}{t}$, siła F jest równa sile ciężkości, która działałaby na ładunek o masie m: $F = m \cdot g$

Po podstawieniu do wzoru:

$$P_{wy} = \frac{m \cdot g \cdot s}{t} = \frac{1200 \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}3}{6} \approx 588\ \text{W}, \quad \left[P_{wy}\right] = \frac{\text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{m}}{\text{s}} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}} = \text{W}$$

b) Sprawność układu równa 0,7 oznacza, że tylko 70% mocy pobieranej przez układ hydrauliczny z silnika elektrycznego jest dostarczana do ładunku jako moc P_{wy}. Brakująca część, a więc 30% P_{we} jest tracona bezpowrotnie w układzie na skutek strat.

A zatem do układu należy dostarczyć odpowiednio wyższą moc, aby sam układ zadziałał na łupany klocek z odpowiednią mocą. Przy sprawności układu na poziomie 70%:

$$\text{skoro } P_{wy} = 0{,}7P_{we}, \quad \text{to: } P_{we} = \frac{P_{wy}}{0{,}7} \approx 840\ \text{W}$$

Warto zapamiętać!

Właśnie sprawność układu równą 0,7 można przyjąć do wstępnych, przybliżonych obliczeń mocy układu. Wielkość ta musi być oczywiście zweryfikowana w toku późniejszych obliczeń.