

# PRZEGLĄD TECHNICZNY

TYGODNIK POŚWIĘCONY SPRAWOM TECHNIKI I PRZEMYSŁU.

Tom LIV.

Warszawa, dnia 26 lipca 1916.

Nr 29 i 30.

TREŚĆ: Kucharzewski F. Postępy hydrauliki. — Milkowski B. Przyczynek do teorii układów niewyznaczalnych. — Tepicht M. Nowoczesne kotły parowe dla wielkich stacji centralnych [dok.].

Architektura. Wielka Warszawa. — Sprawy bieżące i rozmaiteści.

Z 13-ma rysunkami w tekście.

## POSTĘPY HYDRAULIKI.

### I.

Zapoczątkowanej przez Torricellego a rozwijanej głównie we Włoszech i Francji, hydraulicie doświadczalnej, dał w XVIII w. Daniel Bernoulli pierwszą podstawę teoretyczną, w postaci noszącego jego imię twierdzenia. Zbudowana na tej podstawie i zwykle nazywana *hydrauliką*, mechanika stosowana ciał płynnych, jest zbiorem wskazówek, jakie mogą kierować inżyniera przy rozwiązywaniu zadań, dotyczących ruchu cieczy i niektórych gazów. Rozwiązywanie to ma miejsce na zasadach hydromechaniki ogólnej, mianowicie, datującej od Archimidesa a uzupełnionej przez Pascala i Stevina *hydrostatyki* i wytworzonej przez Eulera, d'Alemberta i Lagrange'a *hydrodynamiki* płynów doskonałych. Z tą ostatnią, wiązało początkowo hydraulicę jedno tylko twierdzenie Bernoulli'ego.

Zadania, przy których rozwiązywaniu dostarczać miała wskazówek hydraulika, odnosiły się do wypływu cieczy przez otwory i przewody, ruchu cieczy w rurach, kanałach i rzekach, ruchu powietrza i gazu oświetlającego, oporu jaki stawiają ciecze i gazy, gdy są w ruchu i gdy się w nich poruszają ciała stałe, mierzenia prędkości prądów ciekłych i gazowych, wreszcie budowy silników, pomp i wogóle wszystkich maszyn wodnych. Taki też był program wykładów hydrauliki do końca ubiegłego stulecia. Pojedyncze rozdziały nauki, od których z jednej strony rozwój robót hydrotechnicznych a z drugiej postępy hydrauliki przemysłowej domagały się coraz różnorodniejszych wskazówek, rozwijały się niezależnie jeden od drugiego, usiłując różnymi drogami nawiązywać bliższy stosunek z hydrodynamiką.

Po wyczerpujących doświadczeniach nad wypływem przez otwory i przewody, jakie wykonali Poncelet i Lesbros, pracach Castela i Aubuissona nad biegiem wody w rurach, Dupuita i Hagena w rurach, kanałach i rzekach, Bidone'a nad oporem płynów, Redtenbachera, Rankine'a i Morina nad maszynami wodnymi, największy wpływ na dalszy rozwój hydrauliki wywarły doświadczenia i prace krytyczne Poiseuille'a, Darcy'ego i Bazina we Francji, Weisbacha w Niemczech i Reynoldsa w Anglii. Badania Poiseuille'a (r. 1842) odnosiły się do ruchów powolnych w rurkach włoskowatych i przez długi czas nie były pożytkowane w hydraulicie; rozwinięte wszakże w szerszym zakresie przez Reynoldsa (r. 1883) dały początek odróżnieniu dwóch ruchów: regularnego i burzliwego wody w rurach i kanałach, a na tem odróżnieniu oparte zostały wszystkie nowsze badania i wzory. W 198 doświadczeniach, jakie wykonał Henryk Darcy (r. 1851), zmieniane były: materiał rur, ich średnice, napory i prędkości. Doświadczenia wykazały wpływ na wydatek rur osadu, tworzącego się na ich ścianach, i doprowadziły do wzorów przez długie lata używanych, ze współczynnikami odmiennymi dla rur nowych i pokrytych osadem. Liczne doświadczenia nad przechodzeniem wody przez zasuwy, krany, kłapy i przepustniki, przez kolana i rozgałęzienia rur, wykonane przez Weisbacha (r. 1848), dostarczyły wzorów, zapelniających dotąd podręczniki techniczne. Ustalona w nich została proporcjonalność straty naporu do stosunku  $v^2 : 2g$ , wprowadzonego, przez Weisbacha do wszystkich wzorów hydrauliki. Najszerzy zakres objęły badania Bazina, który nie poprzestając na ścisłym rozbiórce własnych doświadczeń, sprawdzał pomiary swych poprzedników i wywodził wnioski, obejmujące większość znanych faktów. Prak-

tycznym wynikiem tych prac są ściśle wzory na ruch ustalony w kanałach otwartych, naturalnych lub sztucznych, z różnorodnymi ścianami, na rozchodzenie się fal w kanale przy ruchu ustalonym i na wszystkie odmiany wypływu przez przewody. Zajmował się także Bazin samą metodą badań, poddał krytyce najczęściej używane sposoby wykonywania pomiarów wód bieżących, wprowadzając do nich liczne ulepszenia.

Niemniej ważne były wyniki teoretyczne prac Bazina. Ścisłość jego wzorów doświadczalnych jest tak wysoka, że mogą one służyć za punkt wyjścia badań analitycznych, prowadzących do matematycznego wyrażenia prawa ruchu główniejszych postaci prądu wodnego. Z drugiej znowu strony wzory te rzucają światło na najmniej znany czynnik zjawiska, stający się często czynnikiem głównym, mianowicie na opór ścian przewodu, przez który prąd bieży. Opór ten, który teoretycy pomijali pierwotnie, później mieszały z lepkością cieczy, a następnie z tarcieniem strug jednych o drugie, występuje we wzorach Bazina jako fakt zasadniczy, którego koniecznym wynikiem stają się ruchy wirowe, rozchodzące się wśród cieczy i komplikujące jej ruch ogólny.

Wyniki prac Bazina zbliżyły w końcu ubiegłego stulecia hydraulicę do hydrodynamiki, z którą luźny związek tylko podtrzymywać się starali przedtem uczeni francuscy. Po pracach Laplace'a i Poissona nad ruchami peryodycznymi płynów, Navier, Belanger, St. Venant, rozwijali matematyczne konsekwencje hipotezy ruchu strugami równoległymi i posunęli teorię tak daleko, jak pozwalał brak danych co do głównego faktu, mianowicie co do oporu ścian przewodu. Pomimo tego braku, doszli do wzorów, w pewnej części i dziś nie pozbawionych znaczenia. Ale dopiero na dostarczonych przez Bazina podstawach doświadczalnych, przystąpić mógł Boussinesq do odbudowania całej teorii ruchu wody, otrzymując w wielu przypadkach drogą analityczną wzory, nieraz ściśle zgodne z wynikami doświadczeń.

Rozwój ten hydrauliki przypomina, nie dorastając oczywiście swem znaczeniem, ewolucję astronomii w epoce Keplera i Newtona, gdy Keppler doszedł przez obserwację do praw biegu planet, a Newton wyciągnął z nich wzór ogólny, objaśniający do dziś ruchy ciał niebieskich. Zjawiska hydrauliczne wymagają jednak większej liczby hipotez zasadniczych, z których znowu każda obejmuje znacznie więcej czynników, niż prawo ciążenia. Hipotezy te niedopuszczają objaśnień prostych i łatwych do pojęcia, jak to, które uniemożliwiło geniuszowi Newtona. Dla stosowania do jakiegokolwiek systemu, równań ogólnych mechaniki, wyrażać trzeba najprzód analitycznie własności charakteryzujące ten system, które stanowią w teorii samą definicję badanego ciała. W hydraulicie własności te charakteryzują pojęcie stanu płynnego, one też stanowią hipotezy zasadnicze. W drugim szeregu stoją hipotezy, które nazwaćby można uzupełniającymi, bo ich wyrażenie analityczne potrzebnem się staje dopiero wtedy, gdy wnioski osiągnięte na podstawie hipotez głównych okazały się niezgodnymi z rzeczywistością. Odnoszą się one do oporu, jaki stawiają płyny w ruchu, nazwanego przez Newtona „lepkością“, utożsamianego z tarcieniem a przypisywanego dziś wytwarzającym się w masie cieczy ruchom wirowym. Boussinesq przyjął za punkt wyjścia swej teorii wyrażenie tego oporu, wywiedzione przez Bazina z praw ustalonych doświadczeniami. Nieraz

wreszcie niezbędnymi się stają hipotezy mniejszego znaczenia, uproszczające rachunki i umożliwiające całkowanie otrzymanych wyników.

## II.

Do wymienionych prac, które wywarły największy wpływ na rozwój hydrauliki w ubiegłym stuleciu, dodać należy jeszcze, w szerokim zakresie i w ciągu długich okresów czasu wykonywane pomiary, jakie prowadzili Humphreys i Abbot na Mississipi, R. Gordon Cunningham na kanale Gangesu i na Iraouaddi, oraz inne podobne na wielkich rzekach w bieżącym już stuleciu uskuteczniane. Metody prowadzenia pomiarów i rejestrowania wyników postąpiły naprzód i cały rozdział hydrauliki o mierzeniu szybkości prądów uległ znacznemu rozszerzeniu. Przy badaniu zjawisk hydraulicznych, czy to przez obserwację, czy przez doświadczenie lub analizę matematyczną, oznaczanie przychodzi zawsze prawa równoczesnych zmian różnych ilości. Oznaczanie to może być mniej lub więcej ścisłe, ale punktem wyjścia badania musi być rozpoznanie samego kierunku zmian o jakich mowa. Wydaje się to elementarnem i łatwem do wykrycia, a jednak w niektórych przypadkach, do ostatnich czasów, panowały mylne pojęcia co do samego kierunku zmian w danych zjawiskach. I tak np. przyjmowano powszechnie, że powierzchnia przekroju poprzecznego żyły wodnej, wychodzącej z otworu w cienkiej ścianie, ma pewne minimum w pobliżu otworu. Tymczasem Bazin w żyłach poddanych ścisłym pomiarom, owego minimum wcale nie znalazł, zauważył tylko pewne minimum szerokości żyły, którego położenie zależy od położenia obserwatora. Fakt ten tłumaczy pochodzenie przesady, wieloletnią zaś jego trwałość przypisać chyba można nazwie *kontrakcji* (ściśnienia), jaką dawni hydraulicy dali temu pozorowi faktu, nieustalonego ścisłymi pomiarami. Niemniej czasu potrzeba było, by zachwiać ogólnem mniemaniem, że przez miejscowe rozszerzenie koryta rzeki obniżyc można poziom wylewu. Możliwość otrzymania odwrotnego wyniku, dostrzegana już podczas wylewu Loary w r. 1840, ustalona została dopiero badaniami doświadczalnemi inżynierów Vautier'ów, ojca i syna.

Aby z równoczesnych i powtarzanych pomiarów ilości w pewnym zjawisku, mogły być wyciągnięte należyte wnioski, koniecznem jest systematyczne ugrupowanie wyników, dokonywane dawniej za pośrednictwem tablic liczbowych, jedno lub dwuwejściowych, a zastąpione później wykresami kartezyańskimi, w których tablicę jednowejściową zastępuje jedna linia, dwuwejściową — wiązka linii. W ostatnich czasach nomogramy, których charakterystyczną zasadą stanowi, nazwane przez Lalanne'a anamorfozą, przekształcające przez odpowiedni dobór podziałek na wykresach, linii krzywych na linie proste, pozwoliły przedstawiać na jednym wykresie funkcje więcej niż dwóch zmiennych. Rozpowszechnienie przyrządów zegarowych, rejestrujących pomiary i dostarczających diagramów, pozwoliło odtwarzać zjawiska w całej ich ciągłości; metody znów chronofotograficzne dały możność chwytania obrazów zjawisk, w następujących po sobie odstępach czasu bardzo bliskich.

Przekształcenie szkół politechnicznych na wszechnice techniczne w Niemczech podniosło poziom uprawianych w nich nauk, i w urządzonych przy szkołach laboratoriach mechanicznych prowadzić zaczęto badania maszyn wodnych i różnych zjawisk hydraulicznych. Powstawały naprzód oddziały pracowni mechanicznych, poświęcone specjalnie badaniom maszyn wodnych i powietrznych, lub oddziały pracowni fizycznych zajmujące się drobniejszemi doświadczeniami hydraulicznemi, w końcu pojawiły się specjalne pracownie hydrauliczne do badania maszyn wodnych, prowadzenia ćwiczeń hydrometrycznych i wszelkich doświadczeń nad ruchem wody. Profesorowie wszechnic a także inżynierowie, ubiegający się o stopień doktora nauk technicznych, bogacić też zaczęli naukę nowymi przyczynkami. Dążenie do wzmocnienia związku między hydrauliką a hydrodynamiką, zaznaczone przy pracach Bousinesq'a, uwidoczniające się i u nas w pracach Łukasza Bolaszewskiego (Łwów), występuje stale w nowszych pracach hydraulików niemieckich. Prašil (Zurich) doszedł do uławień w całkowaniu równań hydrodynamiki, przekształca-

jąc spólrzędne prostokątne na cylindryczne, co mu pozwoliło poddać badaniom analitycznym ruchy potencyalne wody w przestrzeniach ruchomych, jak kanały międzyłopatkowe turbin. Baudisch rozważał prądy ograniczone równoległymi płaszczyznami, traktując je jako dwuwymiarowe. Prace Prašila, pobudziły Lorenza (Gdańsk) do wystąpienia z nową teorią turbin, żywo roztrząsaną w czasopiśmie technicznych. W r. 1908 Reichel w Charlottenburgu zbudował turbinę na zasadach teorii Lorenza, która próbowana w laboratorium szkolnem dała ujemne wyniki, nie dochodząc nawet do 70% sprawności. Pfarr (Darmstadt) wykonał w tej dziedzinie jedno z najciekawszych doświadczeń, badając w 1910 r. rozkład ciśnień w kanałach międzyłopatkowych turbiny Francisa, podczas jej biegu. Na przeprowadzenie tego doświadczenia pozyskał z „Funduszu jubileuszowego przemysłu niemieckiego“ zapomogę 20 000 mar. Doświadczenia inż. Grethera w pracowni mechanicznej politechniki w Karlsruhe, przeprowadzone nad prądem dwuwymiarowym w kolanach rur o przekroju prostokątnym, wykazały dokładność wyników badań Reynoldsa, co do prędkości krytycznej, stanowiącej granicę między ruchem regularnym a burzliwym różnych cieczy w rurach. Nad wzorami praktycznymi pracowali między innymi Pfarr, Biel, Lang (21-e wyd. „Hütte“); wnioski z prac Reynoldsa, dające ogólny kształt tych wzorów, wyprowadził Blasius; krytyczny przegląd wszystkich prac w tym kierunku podali wraz z wywodem własnego wzoru, inżynierowie lwowscy Biegeleisen i Bukowski (*Gesundheits-Ingenieur*, 1914).

Zajmowało też hydraulików uderzenie wodne w rurach; w r. 1901 zapoczątkował pracę nad tym przedmiotem inżynier włoski Allievi; prowadzili je dalej niektórzy z poprzednio wymienionych inżynierów niemieckich i inż. Rateau we Francji. Wyniki teorii Allievi'ego sprawdzone zostały doświadczalnie w zakładach hydroelektrycznych Ackersand we Viège (Szwajcarya). To nieustanne przerzucanie mostów pomiędzy hydrauliką a hydrodynamiką, polegające na analitycznem opracowywaniu wyników doświadczeń i doświadczalnem sprawdzaniu wyników teorii, zapewnione wzrostem sił naukowych i rozwojem pracowni hydraulicznych przy politechnikach, wróży pomyślnie o dalszych postępach hydromechaniki stosowanej.

Rzecz o rozwój hydrauliki przemysłowej, rozszerzając zakres wykładów o maszynach wodnych, sprawił, że poświęcony tym maszynom rozdział dawnej hydrauliki, przewyższając zaczął swą obszernością sumę pozostałych. Typowy przykład tej podręcznikowej ewolucji stanowiła Hydraulika G. Meissnera, wydana w latach 1894—1899 w czterech tomach, poświęconych: pierwszy hydraulicce, a trzy następne maszynom wodnym. Wykład o tych maszynach, prowadzony w politechnikach jako jeden z działów kursu budowy maszyn, objęły dzieła i podręczniki specjalne, a nauka hydrauliki ograniczoną została do pozostałych rozdziałów, traktujących o hydrostatyce, główniejszych zasadach hydrodynamiki, wypływie przez otwory i przewoły, biegu wody w rurach, kanałach i rzekach, ruchu wód podziemnych, oporze płynów, hydrometrii i ruchu gazów (pneumatyka). Ten ostatni rozdział, znacznie skrócony, utrzymał się w podręcznikach hydrauliki do końca ubiegłego wieku (Flamant r. 1900), pomimo, że jego treść w wykładach szkolnych przeszła całkowicie do termodynamiki. Opuszczany jest też w nowszych podręcznikach francuskich i niemieckich (Dariés r. 1911, Forchheimer r. 1914, Budau r. 1913, Mises r. 1914); niektóre z nich tylko podają wskazówki, odnoszące się do ruchu gazów, przy wykładzie o prądach wodnych. Podręczniki znów angielskie zachowały w dawnym ściśnionym zakresie rozdział o maszynach wodnych (Merriman r. 1908, A. H. Gibson r. 1908). W różnym stopniu uwzględniają one wszystkie, zacieśniający się związek hydrauliki z hydrodynamiką i niejednokowo czynią zadość potrzebom, zbieranych razem w niektórych szkołach na wykładach hydrauliki, słuchaczy dwóch wydziałów: mechanicznego i inżyniersko-budowlanego.

Z hydrodynamiki, rozwijanej w ubiegłym stuleciu pracami znakomitych fizyków angielskich i niemieckich, i zobrażonej w klasycznym podręczniku Lamba, wybrane zostały niektóre działy i opracowane, w zastosowaniu do potrzeb technicznych, przez Prašila (r. 1913) i H. Lorenza (r. 1911). Synte-

zę prac Boussinesq'a stanowi wydana przez A. Boulanger'a w r. 1909 „Hydraulika ogólna”. Najważniejsze tylko szczegóły tych opracowań wchodzić mogą do rozdziału hydrauliki, poświęconego przypomnieniu główniejszych zasad hydrodynamiki.

Nierównomierność w uwzględnianiu potrzeb mechani-

ków i inżynierów budowlanych, przechyla się w nowszych podręcznikach na korzyść mechaników. Uwydatnia się to w zbiorze danych z hydrauliki w ostatnim wydaniu (22-e) podręcznika „Hütte”, a usprawiedliwia znaczeniem, jakie mają urządzenia mechaniczne w rozwoju techniki budowlanej.

Feliks Kucharzewski.

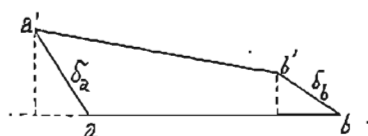
## Przyczynek do teorii układów niewyznaczalnych.

Podał B. Millkowski, inż.

Pomimo zarzucenia wielu przestarzałych systemów mostów i dążności do uproszczenia różnych konstrukcji, teoria układów statycznie niewyznaczalnych nie straciła swego znaczenia. Przeciwnie, wprowadzenie nowych konstrukcji żelazno-betonowych uczyniło znajomość jej jeszcze więcej niezbędną. Obserwacja doprowadziła mnie do przekonania, że nawet zawodowi konstruktorzy niechętnie stosują teorię układów niewyznaczalnych, posilując się wzorami empirycznymi. Tę niechęć do studyów teoretycznych przypisuję głównie zbytnej naukowości i rozwlekłości dzieł specjalnych, często wielotomowych.

Wobec tego stanu, celem niniejszego artykułu jest stwierdzenie, że dla zupełnego opanowania przedmiotu wystarczy kilka wieczorów uważnego czytania. Pomimo znacznych skrótów, podane twierdzenia i przykłady stanowią taką całość, która, moim zdaniem, nawet studentom wyższych zakładów technicznych wystarczać powinna. Opracowanie szczegółów należy zostawić własnej inicjatywie słuchaczy. Teorie naukowo ściśle, chociaż wychodzące z różnych założeń, muszą doprowadzić do tych samych wyników. Dlatego czytelnik znajdzie w niniejszym artykule wzory już mu znane. Nowość stanowi tłumaczenie równań równowagi węzłów układu jako związek, wyrażający sumę momentów sił względem punktów stałych. Ten pogląd starałem się konsekwentnie zastosować do wszystkich przykładów. Niektóre wykresy odkształcenia, o ile mi wiadomo, również nigdzie nie były podane.

Treścią niniejszego artykułu będzie wyznaczenie odporów i sił wewnętrznych układów t. zw. *statycznie niewyznaczalnych*. Nie mając możliwości zupełnego wyczerpania przedmiotu, ograniczymy się do ustrojów żelaznych płaskich (nieprzestrzennych). Ponieważ podamy sposoby wyznaczenia tylko naprężeń głównych, przypuszczamy więc, że pręty ustroju są połączone przegibnie i spójśrodkowo.



Rys. 1.

Układ, w którym pręty kraty nie przecinają się, nazywać będziemy układem *trójkątnym*, w przeciwieństwie do układu *przekątnego*. Ten ostatni przedstawiamy sobie jako wielobok usztywniony przecinającymi się prętami kraty.

Niezależnie od ustroju wewnętrznego i sposobu oparcia układu, między wydłużeniem pręta i przesunięciami węzłów końcowych istnieje związek, który wyrazimy równaniem.

Niech oznaczają:

$F$  — przekrój poprzeczny pręta,

$E$  — współczynnik sprężystości,

$t^0$  — podniesienie temperatury,

$e$  — współczynnik rozszerzalności podłużnej.

Dla wydłużenia pręta  $ab$  (rys. 1) o  $\Delta ab$  mamy wzór:

$$\Delta ab = ab \left( \frac{S}{EF} + et^0 \right).$$

Niech przytem końce pręta przesuną się o  $\delta_a$  i  $\delta_b$  i kąty, zawarte między temi przesunięciami a pierwotnym kierunkiem pręta, będą  $(\delta_a, ab)$  i  $(\delta_b, ab)$ .

Projekując linię łamaną  $aa'bb'$  na kierunek  $ab$  otrzymamy:

$$ab = \delta_a \cos(\delta_a, ab) + (ab + \Delta ab) \cdot \cos(ab, a'b') + \delta_b \cos(\delta_b, ab).$$

Kąt odchylenia pręta od pierwotnego położenia jest bardzo nieznaczny.

Przyjmując, że  $\cos(ab, a'b') = 1$ , otrzymamy związek:

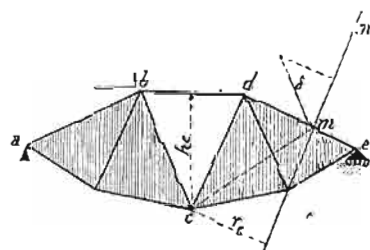
$$\Delta ab = \delta_a \cos(\delta_a, ab) + \delta_b \cos(\delta_b, ab),$$

który wyraża, że wydłużenie pręta równa się sumie rzutów przesunięć węzłów końcowych na pierwotny jego kierunek.

### Geometryczne własności odkształcenia.

#### A. Układ trójkątny.

Niech układ  $abcde$  (rys. 2) składa się z części sztywnych  $abc$  i  $cde$ , połączonych prętem sprężystym  $bd$  i przegubem  $e$ .



Rys. 2.

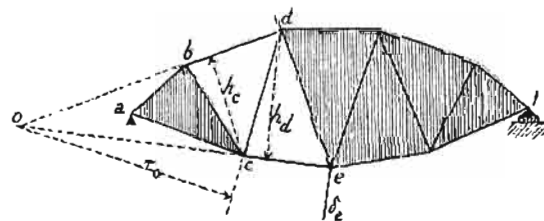
Przy niezmiennym położeniu lewej części układu i wydłużeniu pręta  $bd$  następuje obrót prawej części około punktu  $c$  o kąt  $\omega_c = \frac{\Delta bd}{h_c}$ , i przesunięcie dowolnego punktu  $m$  będzie:

$$\delta_m = \omega_c \cdot cm.$$

Rzut tego przesunięcia na dany kierunek  $mm'$  będzie:

$$\delta_m \cos(\delta, m m') = \omega_c \cdot cm \cdot \cos(\delta, m m') = \omega_c r_o.$$

Zalóżmy następnie, że w układzie  $af$  (rys. 3) wydłuża się przekątna  $cd$  o  $\Delta cd$ , a pręty  $bd$  i  $ce$  są sztywne. Przy



Rys. 3.

niezmiennym położeniu części  $abc$  węzeł  $d$  obróci się około  $b$  i przesunięcie  $\delta_d$  będzie prostopadłe do  $bd$ . Tak samo przesunięcie  $\delta_e$  będzie prostopadłe do  $ce$ .

Stąd wynika, że prawa część układu  $def$  obróci się około środka  $O$ , który będzie przecięciem prostych  $bd$  i  $ce$ . Kąt tego obrotu  $\omega_o$  będzie równy odchyleniu prostej  $de$  względem prostej  $bc$  i składa się z odkształcenia kątów  $\Delta cbd$  i  $\Delta bde$ :

$$\omega_o = \Delta cbd + \Delta bde.$$

Ponieważ w trójkącie  $bcd$  odkształcenia kątów są związane równaniem:

$$\Delta cbd + \Delta bdc + \Delta bcd = 0,$$

to  $\omega_o = -\Delta bcd - \Delta bdc + \Delta bde = -\Delta bcd + \Delta cde.$