

P O L S K A A K A D E M I A N A U K
INSTYTUT PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW TECHNIKI

R O Z P R A W Y
I N Ż Y N I E R S K I E

XXIII - XXVII

WARSZAWA • 1955

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE

SPIS TREŚCI

	Str.
1. Wstęp	5
2. Z historii reologii	6
3. Przepływ ustalony substancji lepko-plastycznej	12
A. Rozwiązania teoretyczne	13
B. Metody doświadczalne i przyrządy	15
I. Metody integralne	16
II. Metody różnicujące	18
C. Przykłady badania reologicznego układów rozproszonych	22
4. Bibliografia	26

1. Wstęp¹⁾

W ciągu ostatnich lat kilkudziesięciu rozwinęła się szeroko reologia — nauka o płynności materii. Jest to nowa dziedzina nauki, nie ma więc jeszcze dostatecznie określonego zakresu i treści. Reologia rozpatruje przede wszystkim zagadnienia odkształcenia i przepływu materiałów łatwo odkształcalnych, tj. przepływ lepkich cieczy, anomalie lepkości, plastyczność koloidów oraz zjawiska relaksacji, opóźnienia sprężystego i tyksootropii układów rozproszonych.

Z zagadnieniami reologii spotykamy się obecnie w każdej dziedzinie przemysłu. W technologii najrozmaitszych procesów wytwórczych, w projektowaniu i w obliczeniach konstrukcyjnych uwzględnia się dziś wyniki badań reologicznych nad niezliczonym wprost mnóstwem materiałów. Dla przykładu wymienimy: gliny, gleby, torfy, farby, smary gęste, różne produkty otrzymywane z ropy naftowej (oleje, bitumy itp.), polimery wysokiego rzędu, różnorakie materiały budowlane (zaprawy cementowe i wapienne itp.), roztwory gliny stosowane w wiertnictwie, kleje, smóły, roztwory kauczuku, żelatyny i krochmalu, różne białka (kazeina, proteina itp.), tłuszcze i wiele innych produktów przemysłu spożywczego, rozmaite materiały włókniste (jedwab, wełna, włókna sztuczne itp.), żużle, szkła, materiały ogniotrwałe i inne stopione krzemiany. W ZSRR reologia rozwinęła się szczególnie szeroko w związku z uprzemysłowieniem kraju i mechanizacją różnorodnych procesów wytwórczych. Aby móc wykonywać obliczenia i użytkować te lub inne maszyny i mechanizmy, trzeba znać własności reologiczne materiałów, które za pomocą tych maszyn obrabiamy, transportujemy itd.

Reologia rozpatruje procesy związane z nieodwracalnymi, trwałymi odkształceniami materii. Jest ona przeto nauką bliską hydrodynamiki i teorii sprężystości. Teoria sprężystości omawia odkształcenia sprężyste, odwracalne, niezależne od czasu i o rozmiarach nieznaczących. Jest to pierwsze przybliżenie do rzeczywistości. Tymczasem nie ma ciał absolutnie sprężystych. Wiadomo dobrze, że wszystkie ciała czy to w stanie ro-

¹⁾ Praca przedstawiona na Kursie Naukowym Zakładu Mechaniki Ośrodków Ciągłych IPPT PAN w sierpniu 1953 r. w Kanpaczu.

dzimym, czy też w postaci wytworów przemysłowych posiadają w większym lub mniejszym stopniu zdolność płynięcia. Najlepsze gatunki stali sprężystej, znajdując się pod dostatecznie dużym obciążeniem, z biegiem czasu odkształcają się trwale wskutek nieodwracalnych względnych przemieszczeń cząstek żelaza i węgla, tj. wskutek płynności materii. Nawet takie ciała stałe, jak skały, przejawiają płynność w wielu przypadkach. Można to łatwo zaobserwować w górach, gdzie pokłady skalne wskutek odkształceń plastycznych związanych z ruchami skorupy ziemskiej są powyginane w najrozmaitszy sposób.

Reologia stanowiąc część mechaniki została wyodrębniona w oddzielną naukę dopiero niedawno, bo zaledwie piętnaście czy dwadzieścia lat temu, ale podstawy jej zakładano stopniowo w ciągu uprzednich lat dziesiątków i setek. Reologia zapożyczyła przy tym wiele z mechaniki i teorii sprężystości, a szeroko posługiwała się również metodami wiskozymetrii.

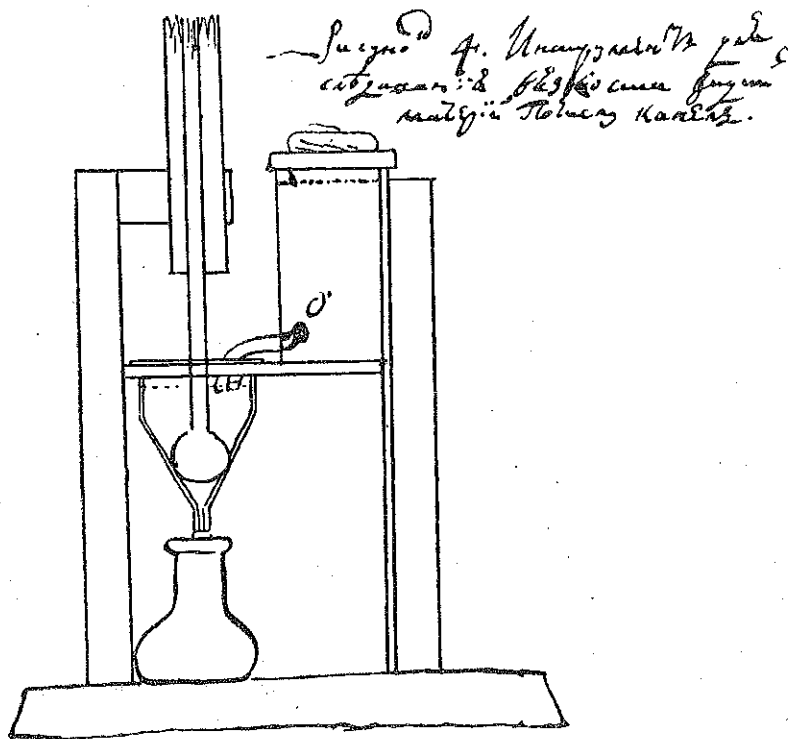
Twórcami głównych działów reologii są wybitni rosyjscy uczeni: M. W. Ł o m o n o s o w, [1], D. I. M i e n d i e l e j e w, [2], N. P. P i e t r o w, [3], F. N. S z w i e d o w, [4], N. S. K u r n a k o w, [5], i inni.

W pracy niniejszej przedstawiony jest najpierw krótki rys historii rozwoju badań w dziedzinie reologii w Rosji do Wielkiej Październikowej Rewolucji Socjalistycznej. Następnie podano opis szeregu prac uczonych radzieckich nad własnościami reologicznymi układów rozproszonych, przy czym opis zilustrowano przykładami zaczerpniętymi głównie z badań piszącego te słowa i jego współpracowników. Artykuł omawia: fenomenologiczną teorię przepływu lepko-plastycznego układów rozproszonych; część doświadczalną związaną z konstruowaniem przyrządów i opracowaniem metod pomiaru reologicznych parametrów koloidów; próby interpretacji koloidalno-molekularnej procesów przepływu lepko-plastycznego układów rozproszonych oraz przykłady praktycznego stosowania wyników badań reologicznych.

2. Z historii reologii

Wielki uczyony rosyjski M. W. Ł o m o n o s o w opracowując głoszoną przez siebie teorię kinetyczno-molekularną budowy materii interesował się zagadnieniami płynności cieczy. Wynałazł przy tym wiskozymetr kapilarny, którego schemat podany jest na rys. 1. Zasada działania przyrządu jasno wynika z rysunku. Uchwała Kancelarii Akademii Nauk z dnia 21 maja 1751 r., zawierająca postanowienie zbudowania dla Ł o m o n o s o w a szeregu przyrządów, nazwała ten wiskozymetr «instrumentem do badania lepkości substancji ciekłych według liczby kropel», [1].

Rzecz ciekawa, że Ł o m o n o s o w miał zamiar wykonywać pomiary lepkości cieczy w związku z badaniami «sił spójności» (cząsteczek) w cieczach. Chciał przy tym badać siły spójności zarówno cieczy czystych, jak i roztworów, np. «spójność kropeł alkoholi», «spójność kropeł przy nadmiarze kwasu» i «spójność bitumów». Widzimy więc, że Ł o m o n o s o w zajmował się również zagadnieniami mikroreologii.



Rys. 1. Schemat wiskozymetru kapilarnego M. W. Łomonosowa (1751 r.)

Nie będziemy zatrzymywali się dłużej na ogólnie znanych pracach akademików petersburskich Daniela Bernoulliego, [6], i Leonarda Eulera, [7], nad podstawami hydrodynamiki cieczy idealnej. Wspomniemy natomiast o ciekawych, a do niedawna mało jeszcze znanych dociekaniach profesora uniwersytetu w Kazaniu I. S. Gromieki, [8], który pracując w dziedzinie hydrodynamiki po raz pierwszy uwzględnił ruch wirowy w równaniach ruchu cieczy.

Należy zwrócić uwagę na wybitne dzieło D. I. Miendielejewa z r. 1880 *O oporze cieczy*, [2]. Te badania genialnego chemika i fizyka nie są tak powszechnie znane, jak jego wspaniałe prawo okresowości i wiele innych prac. Analiza spuścizny Miendielejewa w dziedzinie prze-

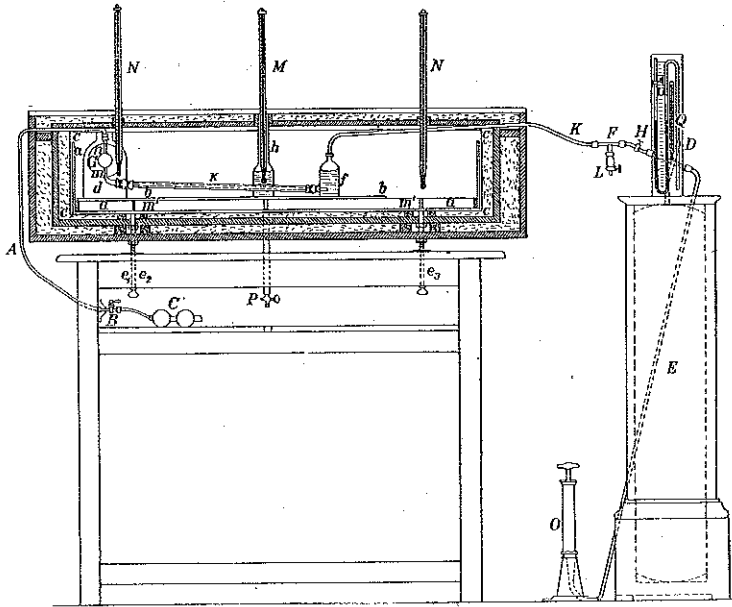
plywu cieczy wskazuje, że wiele uwagi poświęcił on ugruntowaniu ogólnych zasad hydrodynamiki cieczy lepkiej. W pracach swych, poświęconych w znacznym stopniu zagadnieniom lotnictwa, rozpatrywał oczywiście przede wszystkim problemy aerodynamiki. Jednak badał też szczególnie szereg ważnych i nie wyjaśnionych podówczas procesów przepływu cieczy. Roztrząsając kwestię o zależności oporu od prędkości ruchu cieczy *M i e n d i e l e j e w* zupełnie słusznie wskazał, że przy małych prędkościach przepływu opór jest proporcjonalny do prędkości, przy prędkościach zaś dużych — do kwadratu prędkości. Przypomnijmy, że artykuł *O. R e y n o l d s a*, [9], w którym autor pisze o laminarnym i turbulentnym przepływie cieczy, ukazał się później, mianowicie w 1883 r.

Prace *M i e n d i e l e j e w a* odegrały dużą rolę pod koniec zeszłego wieku wpływając na rozwój w Rosji licznych badań z dziedziny hydrodynamiki, hydrauliki i aerodynamiki, które właściwie wykraczają poza zakres reologii (*N. J. Ż u k o w s k i*, [10], *S. A. C z a p ł y g i n*, [11], i inni), z dziedziny reologii koloidów (*F. N. S z w i e d o w*, [4], i inni) oraz z dziedziny reologii smarów (*N. P. P i e t r o w*, [3], i inni). Wybitny moskiewski mechanik i fizyk, *N. J. Ż u k o w s k i*, w referacie na XIII Zjeździe rosyjskich przyrodników i lekarzy w Tbilisi (1913 r.) powiedział, [12]: «*D. I. M i e n d i e l e j e w* wskazał drogę, po której należy kroczyć w badaniach nad trudnymi zagadnieniami oporu cieczy».

N. P. P i e t r o w jest twórcą hydrodynamicznej teorii smarowania maszyn, [3]. Jednocześnie założył podstawy reologii smarów. Skonstruował też i zbudował bardzo dokładny wiskozymetr kapilarny, [13], którego schemat podaje rys. 2. Badany smar, zawarty w zbiorniku *f*, przepływa przez kapilarę *k* do kulki *G* pod ciśnieniem, które wytwarza się w manostacie *E* za pomocą pompy *O*. Ciśnienie mierzy manometr wodny *D*. Do mierzenia czasu, w ciągu którego kulka *G* napełnia się smarem, służy sekundomierz. Przyrząd umieszczano w termostacie, przy czym temperatura kontrolowana była za pomocą trzech termometrów.

Opisany przyrząd *P i e t r o w a* był pierwszym wiskozymetrem bezwzględny, nie wymagającym uprzedniego cechowania. *P i e t r o w* bowiem, aby obliczyć lepkość według wzoru *P o i s e u i l l a - H a g e n a*, bardzo dokładnie ustalił wymiary kapilary i kulki wiskozymetru. Toteż wyniki jego badań nad lepkością wody były nie mniej dokładne niż dane *P o i s e u i l l a*, [14]. Jedną z wydatnych różnic pomiędzy wiskozymetrem *P i e t r o w a* a przyrządem *P o i s e u i l l a* polega na tym, że *P i e t r o w* zastosował dwa zbiorniki na końcach kapilary. Omówiliśmy bliżej wiskozymetr *P i e t r o w a*, gdyż przyrządy tego typu były później często stosowane w ZSRR i innych krajach do badań nad własnościami reologicznymi układów rozproszonych.

P i e t r o w oznaczył lepkość kilkudziesięciu olejów smarowniczych mineralnych i roślinnych w granicach temperatur od 20° do 60°C. Ustalił przy tym, że nachylenie temperaturowych krzywych lepkości olejów roślinnych jest znacznie większe niż mineralnych. Na podstawie tych badań P i e t r o w dał wskazówki, jak w sposób naukowy dobierać oleje do smarowania maszyn i jak zamieniać jeden olej na inny.



Rys. 2. Schemat wiskozymetru kapilarnego N. P. P i e t r o w a do mierzenia lepkości smarów w szerokich zakresach temperatur

Znaczenie prac P i e t r o w a wyrasta daleko poza zakres reologii smarów. W owym czasie zagadnienia hydrodynamiki były jeszcze bardzo niejasne; tak więc bynajmniej nie było rzeczą pewną, że ogólne równanie ruchu cieczy lepkiej N a v i e r - S t o k e s a można stosować do obliczeń hydrodynamicznych i wiskozymetrycznych. P i e t r o w, po zapoznaniu się z obszerną literaturą z dziedziny hydrodynamiki teoretycznej i doświadczalnej od czasów N e w t o n a począwszy (E u l e r, B e r n o u l l i, C o u l o m b, N a v i e r, S t o k e s, M e y e r, G i r a r d, H e l m h o l t z, J a c o b s o n, P o i s e u i l l, H a g e n, M i e n d i e l e j e w i inni) oraz po zanalizowaniu i krytycznym rozpatrzeniu tego olbrzymiego materiału, doszedł do wniosków w zupełności słusznych. Był pierwszym, który wykazał, że dokładne doświadczenia P o i s e u i l l a (z laminarnym przepływem cieczy przez rury) całko-

wicie potwierdzają teoretyczne równania hydrodynamiki cieczy lepkiej Newtona - Naviera - Stokesa.

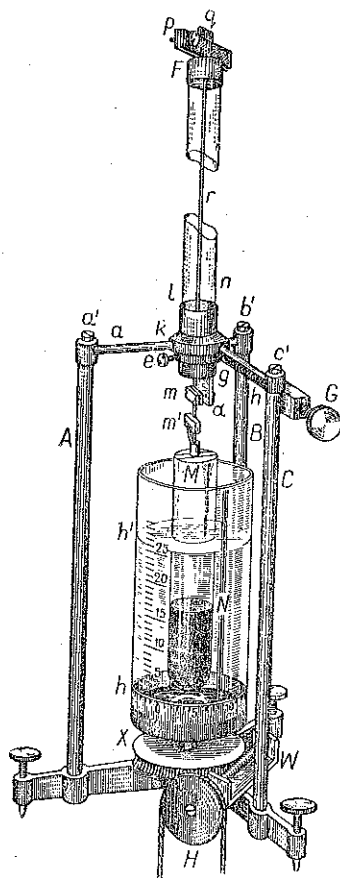
Twórcą reologii układów rozproszonych jest F. N. Szwiedow, który w słynnych swych pracach, [4], pierwszy stwierdził anomalię lepkości i sprężystość postaci koloidów na przykładzie 0,5% roztworu wodnego żelatyny. Dowiódł on, że roztwory koloidalne, nawet o małym stężeniu, zachowują się podczas przepływu inaczej niż idealne newtonowskie cieczy lepkie, wykazują bowiem granice płynności (graniczne naprężenie ścinające). Te prace Szwiedowa są bardzo ciekawe i do dziś zachowały pierwszorzędne znaczenie.

Stosowany przez Szwiedowa przyrząd, oparty na zasadzie obracającego się walca, przedstawiony jest na rys. 3. Substancję badaną umieszczano między dwoma współosiowymi wałkami szklanymi, z których wewnętrzny, *M*, zawieszony był na nici sprężystej; zewnętrzny, *h'h*, można było wprowadzać w ruch obrotowy za pomocą motoru elektrycznego. Obserwując skręcenie nici sprężystej podczas równomiernego obrotu walca zewnętrznego, wyznaczano lepkość substancji badanej, obracając zaś — w czasie spoczynku walca zewnętrznego — główkę, *F*, nitki podwieszenia, badano sprężystość postaci danej substancji.

Szwiedow ustalił moduł ścinania, *G*, 0,5% roztworu żelatyny na 0,535 dyn/cm². Badając proces relaksacji tego roztworu Szwiedow wykazał, że równanie Maxwella, [15], nie pokrywa się z danymi doświadczalnymi. Naprężenia nie znikają całkowicie, wobec czego Szwiedow wprowadził wyraz dodatkowy do równania Maxwella. Czas relaksacji, *T*, wspomnianego roztworu żelatyny wyniósł 13,7 sek.

Stwierdziwszy anomalię lepkości Szwiedow ustalił, że w przypadku 15-krotnego zwiększenia prędkości obrotu walca lepkość 1% roztworu żelatyny zmniejsza się 7-krotnie.

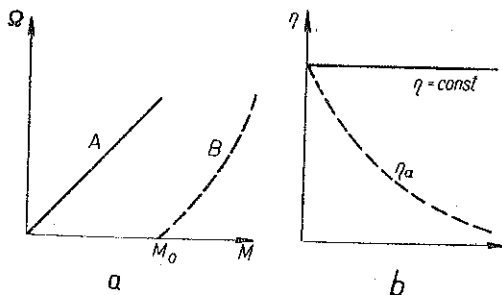
Szwiedow pierwszy więc zaobserwował w układach koloidalno-rozproszonych te zjawiska anomalii, których graficzne ujęcie wygląda



Rys. 3. Przyrząd F. N. Szwiedowa z obracającym się wałkiem do badania sprężystości postaci oraz anomalii lepkości koloidów

zwykle tak, jak to podaje rys. 4. Na osi odciętych tego rysunku odłożony został moment obrotowy, M , a na osi rzędnych prędkość kątowna obrotu walca wiskozymetru, Ω . Zgodnie z całą równania Newtona otrzymana przez Pietrowa, mianowicie $\eta = kM/\Omega$, gdzie η jest lepkością cieczy, a k stałą przyrządu obliczoną na podstawie jego wymiarów, wykres $\Omega = f(M)$, jeśli chodzi o ciecz lepka idealną, jest prostoliniowy (linia A na rys. 4a). Gdy natomiast chodzi o roztwory koloidalne i gruboziarniste układów rozproszonych, to zależność Ω i M jest krzywo-

liniowa (krzywa B na rys. 4a). Z rys. 4b wynika, że lepkość anomalna układów koloidalno-rozproszonych, η_a , jest wielkością zmienną, malejącą ze wzrostem naprężenia ścinającego, τ , lub — co na jedno wychodzi — ze wzrostem gradientu prędkości. Lepkość idealnych cieczy newtonowskich, η , nie zależy, oczywiście, ani od naprężenia, ani od prędkości ścinania. Trzeba podkreślić, że jeśli do doświadczeń stosujemy wiskozymetry kapilarne, to otrzymujemy takie same zależności.



Rys. 4. Wykresy charakteryzujące anomalie lepkości układów rozproszonych. Linie ciągłe — idealna ciecz newtonowska; linie kropkowane — układy rozproszone o lepkości anomalnej

Opracowując wyniki swych doświadczeń S z w i e d o w pierwszy ułożył równanie ustalonego przepływu lepko-plastycznego. Równaniu temu nadał następującą postać:

$$(1) \quad \eta_a = GT + \frac{\Theta}{\dot{\gamma}},$$

gdzie η_a jest lepkością anomalną (zmienną), Θ granicznym naprężeniem ścinającym, $\dot{\gamma}$ prędkością ścinania, tj. gradientem prędkości. Wielkość η_a można zastąpić stosunkiem $\tau/\dot{\gamma}$, gdyż lepkość anomalna obliczana była jako stosunek całego naprężenia ścinającego, τ , do gradientu prędkości. Według S z w i e d o w a, tak samo zresztą jak i według M a x w e l l a, można prócz tego założyć, że iloczyn modułu ścinającego, G , przez czas relaksacji, T , równa się rzeczywistej lepkości ośrodka, η_{pl} , którą obecnie nazywamy lepkością plastyczną. W takim razie

$$(2) \quad \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \eta_{pl} + \frac{\Theta}{\dot{\gamma}}.$$

Oznaczając gradient prędkości $\dot{\gamma}$ przez dv/dz można wreszcie napisać równanie przepływu lepko-plastycznego w następującej postaci:

$$(3) \quad \tau - \Theta = \eta_{pl} \frac{dv}{dz}$$

Istnienie granicznego naprężenia ścinającego, Θ (granica płynności), w układach koloidalno-rozproszonych uwidaczniają wykresy w rodzaju rys. 4a. Punkt przecięcia M_0 krzywej B z osią odciętych wskazuje, że w razie momentów obrotu mniejszych od M_0 płynięcie układu lepko-plastycznego nie dochodzi do skutku. Wartość Θ łatwo obliczyć znając M_0 , ponieważ M_0 jest prostą funkcją Θ . Jeżeli założymy, że $\Theta = 0$, tj. że substancja nie posiada granicy płynności, to równanie (3) przekształca się w zwykłe newtonowskie równanie przepływu lepkiego.

W r. 1912 uczeń F. N. Szwidowa, B. P. Wienbierg, [16], po raz pierwszy scałkował równanie (3) biorąc dane uzyskane przy użyciu wiskozymetru z obracającym się walcem. Wienbierg przeprowadzał badania reologicznych własności lodu, [17]. Wraz z szeregiem współpracowników poddawał również badaniom własności reologiczne bitumów i wydał serię publikacji z tego zakresu, [18]. Opracował przy tym kilka nowych przyrządów i metod.

Równanie (3) było odtąd szeroko stosowane w reologii układów rozproszonych. Dla przepływu ośrodka lepko-plastycznego przez rurę cylindryczną ułożył to równanie Bingham, a scałkował Buckingham, [19]. Piszący te słowa wraz z A. M. Gułkinem dowiódł, [20], że układ równań Hencky'ego, [21], oraz A. A. Iljuszina, [22], wyraża własności takiego samego ośrodka lepko-plastycznego, jak i równanie (3).

Do prac F. N. Szwidowa zbliżone są badania Diemietca nad własnościami mechanicznymi cieczy i roztworów koloidalnych, w szczególności jego obserwacje co do dwójłomności ciekącego płynu, [23]. Z drugiej strony nieco na uboczu od tych samych zagadnień stoją prace N. A. Gieziechusa, [24], o zjawisku opóźnienia sprężystego w kauczukach.

3. Przepływ ustalony substancji lepko-plastycznej

Równanie przepływu lepko-plastycznego, [3], Szwidowa-Bingham rozwiązuje się dość łatwo w szeregu przypadków. Toteż sprawdzano je wielokrotnie doświadczeniami z różnymi układami rozproszonymi. W licznych przypadkach otrzymano przy tym wyniki zadowalające.

Zgodnie z równaniem (3) przepływ substancji plastycznych, związany z odkształceniami nieodwracalnymi, zaczyna się dopiero wtedy, kiedy naprężenia przekraczają graniczne naprężenie ścinające, Θ . Przy naprężeniach mniejszych od Θ można zaobserwować jedynie naprężenia sprężyste. Taka definicja przepływu plastycznego w znacznym stopniu odpowiada definicji, jaką w postaci jakościowej podał już Maxwell, [25]. Należy tylko zwrócić jeszcze uwagę na ściślejsze sformułowanie: gdy naprężenia ścinające są mniejsze od Θ , wówczas w ciałach rzeczywistych można obserwować zjawiska sprężysto-kinetyczne, tzn. procesy opóźnienia sprężystego.

Kiedy jednak chodzi o przepływ ustalony, to można prawie zawsze nie uwzględniać tych odkształceń jako nikłych. Natomiast trwałe odkształcenia lepko-plastyczne układów rozproszonych są bardzo duże, co właśnie dobitnie charakteryzuje reologię substancji łatwo odkształcalnych.

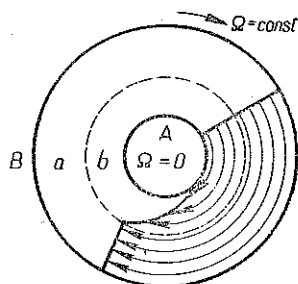
A. Rozwiązania teoretyczne. Wracając do równania (3) zauważymy, że oprócz podanych wyżej przykładów, mianowicie rury o przekroju kołowym, [19], [26], i względnego obrotu walców współosiowych, [16], [27], [28], zostało ono scałkowane w następujących przypadkach: podłużnie przesuwany walec, [29], zgniatanie walca, [30], przepływ przez kapilary szczelinowe i pierścieniowe ([20], odsyłacz pierwszy; [31]), przepływ płaski dwóch stykających się mas lepko-plastycznych, [32], obrót wału w łożysku przy użyciu smaru lepko-plastycznego ([20], odsyłacz drugi), przepływ po równi pochyłej, [33], [34]. Oczywiście, w przypadkach bardziej złożonych równania różniczkowe przepływu substancji lepko-plastycznej trzeba było przedstawiać w bardziej ogólnej postaci, mianowicie według Henck'y'ego - Iljuszina, [20], [21], [22].

Przystępując do rozwiązania tego rodzaju zadań, trzeba zawsze brać pod uwagę, że substancja lepko-plastyczna, znajdująca się pod działaniem naprężeń w trakcie przepływu, może mieć obszary odkształceń tak plastycznych, jak i sprężystych. W obszarach podlegających tylko sprężystym odkształceniom odwracalnym naprężenie nie osiąga granicznego naprężenia ścinającego. Inaczej ma się rzecz z obszarami odkształceń plastycznych: naprężenia przekraczają tu granicę płynności, a przepływ substancji dokonywa się nieodwracalnie.

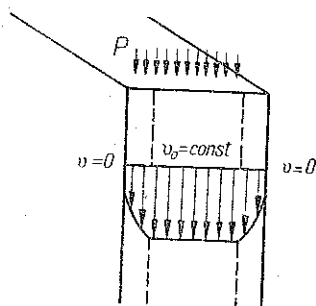
Jednym z podstawowych zadań reologii teoretycznej i doświadczalnej jest rozgraniczenie tych obszarów bądź stref. Na rys. 5 przedstawione są obszary odkształceń sprężystych (a) i plastycznych (b) substancji lepko-plastycznej, znajdującej się w szczelinie między dwoma współosiowymi walcami, A i B, z których jeden (w danym przypadku zewnętrzny, B)

obraca się ze stałą prędkością kątową Ω . Przypadek ten, rozpatrzony teoretycznie, sprawdzono również doświadczalnie, [28].

Schemat na rys. 6 obrazuje rozkład prędkości przepływu, gdy substancja lepko-plastyczna przesuwana jest pod ciśnieniem P przez kapilare płaską, tzn. przez wąską szczelinę o przekroju prostokątnym. Środkowa część masy — tak samo jak to się dzieje w rurze o przekroju kołowym — przesuwa się na podobieństwo ciała sztywnego z prędkością stałą v_0 .



Rys. 5. Obszary odkształceń sprężystych (a) oraz plastycznych (b) w układzie lepko-plastycznym, znajdującym się w szczelinie między współosiowymi wałcami, przy czym wałek zewnętrzny obraca się z prędkością kątową 0



Rys. 6. Rozkład prędkości przepływu układu lepko-plastycznego przez kapilare płaską pod ciśnieniem P

Rozpatrzono też przypadki, kiedy w lepko-plastycznym układzie rozproszonym, przepływającym przez rurę o przekroju kołowym lub pierścieniowym, graniczne naprężenie ścinające, Θ , lub lepkość plastyczna, η_{pl} , okazują się zmiennymi wzdłuż osi lub wzdłuż promienia rury, [35]. Może się to zdarzyć w razie, gdy część ośrodka dyspersyjnego (np. wodnego roztworu torfu) odsącza się przez porowate ścianki rury. Próbowano rozstrzygnąć zagadnienie opadania kuli w ośrodku lepko-plastycznym, [36], jednak nie udało się przy tym uzyskać rozwiązania ścisłego, [34].

Próbowano dla przepływu lepko-plastycznego opracować teorię podobieństwa i ustalić właściwe kryteria podobieństwa, [30], [37], [38]. Praca w tym ważnym kierunku powinna być w dalszym ciągu prowadzona i poszerzona. Jeżeli chodzi o przepływ lepko-plastycznego układu rozproszonego (roztworu gliny) przez rury, to zaproponowano uogólnione kryterium Reynolds a, które obejmuje graniczne naprężenie ścinające, [37].

Należy jeszcze raz podkreślić, że jedna z charakterystycznych własności przepływu lepko-plastycznego układów rozproszonych — materiałów łatwo odkształcalnych — wyróżnia te materiały od metali, minerałów, materiałów kamiennych i temu podobnych «ciał stałych», których pla-

styczność została rozpatrzona w szeregu rozpraw, ([39], [40], [41], [42], [43] i inne). Charakterystyczna ta własność polega na tym, że procesy ich przepływu związane są z bardzo dużymi odkształceniami lepko-plastycznymi i z dużymi prędkościami odkształcenia.

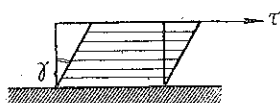
Wymienione powyżej zagadnienia mają określone znaczenie praktyczne. Uzyskane rozwiązania stosowane są bowiem bądź do obliczenia wartości Θ i η_{pl} , gdy wielkości te bywają określane doświadczalnie dla różnorodnych układów rozproszonych przy użyciu wiskozymetrów kapilarnych, obrotowych itd., bądź też do obliczeń w różnych przypadkach przepływu układów rozproszonych oraz przy opracowaniu projektów licznych procesów technologicznych, [44]-[52].

B. Metody doświadczalne i przyrządy. Należy zatrzymać się nieco przy metodach i przyrządach stosowanych do badania reologicznego koloidalnych i gruboziarnistych układów rozproszonych. Doświadczenia metodyczne przeprowadzamy w tym celu, żeby móc konstruować przyrządy i opracować metodykę wyznaczania za ich pomocą parametrów reologicznych Θ i η_{pl} , czasu relaksacji oraz charakterystyk opóźnienia sprężystego. Przyrządy i metody reologiczne są nader różnorakie, co tłumaczy się ogromną różnorodnością cieczy rzeczywistych i układów rozproszonych, jako też praktycznymi warunkami ich przepływu. Nie należy sądzić, iż jeden albo dwa jakiegokolwiek przyrządy będą mogły obsłużyć wszystkie przypadki reologicznych pomiarów dla cieczy i układów rozproszonych. Do substancji o rozmaitym stężeniu, dla różnych naprężeń i różnych gradientów prędkości, stosujemy rozmaite przyrządy. Przyrządy wyznaczające charakterystyki warunkowe (wiskozymetry typu englerowskiego, penetrometry, farynograf do badania ciasta itd.) nie powinny być stosowane w reologii. Nie będziemy ich tu rozpatrywali; zresztą autor tego referatu poddał je krytyce w szeregu swych prac, [50], [53].

Podkreślimy, że dokonanie wyboru właściwych przyrządów i metod nie jest często rzeczą prostą, a w dziedzinie reologii wybór taki ma szczególnie ważne znaczenie, jeżeli badania mają być uwieńczone powodzeniem. Przytoczymy tutaj dwa przykłady historyczne. Była już mowa o tym, że *L o m o n o s o w*, [1], pierwszy (w r. 1751) zastosował wiskozymetr kapilarny do badania lepkości cieczy (przepływ ustalony); jest to i dziś jeszcze podstawowa metoda wiskozymetrii. Później (w r. 1798) *C o u l o m b*, [54], skonstruował wiskozymetr oparty na zasadzie drgań skrętnych (przepływ nieustalony); obecnie jednak przyrząd ten prawie wcale nie znajduje zastosowania w wiskozymetrii.

Metody i przyrządy reologiczne można podzielić na integralne (całościowe) i dyferencjalne (różnicujące). Poza tym istnieją przyrządy z jednorodnym i niejednorodnym polem naprężeń i odkształceń.

1. Metody integralne — przyrządy kapilarne, obrotowe itp. — pozwalają stwierdzić sumaryczny efekt przepływu, a mianowicie: objętość substancji przepływającej przez kapilarę w jednostce czasu pod określonym ciśnieniem, prędkość kątową lub ilość obrotów walca na sekundę pod działaniem odpowiedniego obciążenia w wiskozymetrze obrotowym itd. Do ciał o anomalnej lepkości i plastyczności należy koniecznie stosować metody całościowe z jednorodnymi polami naprężeń i odkształceń, ponieważ tłumaczenie obserwowanych zjawisk jest w takich warunkach znacznie prostsze: stwierdzamy wówczas ścinanie proste w całej objętości układu rozproszonego, zgodnie ze schematem podanym na rys. 7.



Rys. 7. Schemat odkształcenia ścinania prostego

τ - naprężenie styczne, γ - kąt charakteryzujący odkształcenie przy ścinaniu (czyli gradient prędkości)

Jest rzeczą ważną, żeby aparatura, za pomocą której przeprowadzamy pomiary, była prosta, tj. żeby powierzchnie stałe, między którymi umieszczamy badaną masę, dawały proste warunki brzegowe i żeby prócz tego opracowanie obserwacji nie było utrudnione. Ostatnie zastrzeżenie jest szczególnie ważne, gdy chodzi o przyrządy do badań masowych, zwłaszcza do badań w laboratoriach fabrycznych.

1. Poniżej przytaczamy metody związane z jednorodnym lub prawie jednorodnym polem naprężeń i odkształceń.

(a) Typy przyrządów rotacyjnych jednospójnych z walcem obrotowym: F. N. S z w i e d o w, [4], M. P. W o ł a r o w i c z, [55], [56], P. A. R i e b i n d i e r ze współpracownikami, [57], G. W. W i n o g r a d o w ze współpracownikami, [58], A. A. T r a p i e z n i k o w, [59], i inni (gdy przyrządy te mają wąską szczelinę, to pole bliża się do jednorodnego). Dwuspójne przyrządy obrotowe (T. J. G o r a z d o w s k i, [60], o jednorodnym polu z aparatem roboczym w postaci dwóch półtorusów specjalnego kształtu lub w postaci dwóch pierścieni stożkowych. Dwuspójny przyrząd obrotowy D. M. T o ł s t o j a, [61], z pierścieniami o polu zbliżonym do jednorodnego.

Za pomocą obrotowego wiskozymetru M. P. W o ł a r o w i c z a RW-4 można określać graniczne naprężenie ścinające, θ , i lepkość plastyczną, η_{pl} , stężonych układów rozproszonych (glin, [28], farb, [55], gęstych smarów, [63], torfu, [64], zapraw budowlanych, [65], i innych). Schemat tego wiskozymetru podaje rys. 8.

Wiskozymetr obrotowy M. P. W o ł a r o w i c z a RW-7 stosuje się do cieczy i układów rozproszonych o wysokiej lepkości, zwłaszcza zaś do olejów smarowniczych w obszarze niskich temperatur, do 60°C, [51], [56], [66], oraz do bitumów w temperaturach wyższych aż do 180°C, [67]. Na rys. 9 podany jest widok ogólny tego wiskozymetru.

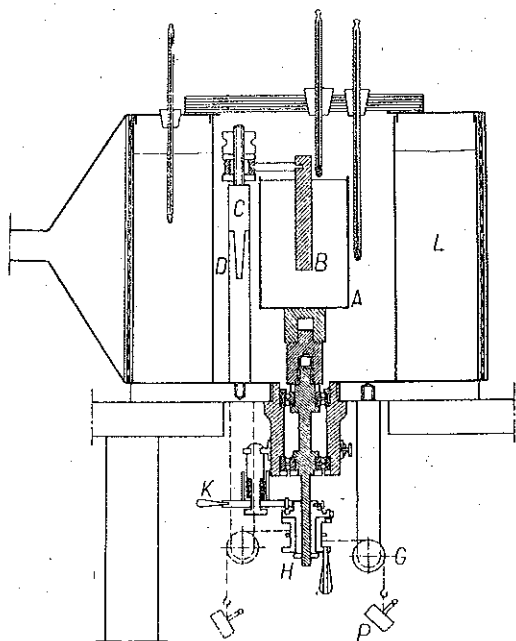
(b) Przyrządy z posuwem podłużnym, a więc: ze stycznym posuwem płytki poziomej, nakładanej na sześcian z badanej substancji (B. P. Wiejnbierg, [68], D. M. Tołstoj, [69]); z podłużnym posuwem walców współosiowych (D. M. Tołstoj, [29], M. P. Wołarowicz, [70], D. S. Wielikowski, [71]), między którymi umieszcza się badany układ rozproszony (przy małej szczelinie pole zbliżone jest do jednorodnego); z podłużnym posuwem płytki pionowej, wyciąganej z naczynia zawierającego badaną substancję (P. A. Riebindier i S. J. Wiejler, [72]), przy czym pole zbliżone jest do jednorodnego. Tych trzech metod, opartych na posuwie podłużnym, używa się przy stosunkowo nieznacznych odkształceniach i niewielkich prędkościach odkształcenia.

Schemat na rys. 10 przedstawia przyrząd D. M. Tołstoj a, [69]. W przyrządzie tym następuje ścinanie proste układu rozproszonego, L, umieszczonego między dwiema równoległymi płytkami poziomymi, z których dolna, B, jest nieruchoma, a górna, S, przesuwa się równoległe do niej.

2. Poniżej wymieniamy te spośród metod integralnych, które zalicza się do niejednorodnych.

(a) Przyrządy typu kapilarnego. Do smarów zastosowali je D. S. Wielikowski, [71], M. M. Kusakov, [73], G. W. Winogradow, [74], G. I. Fuks, [51], [75], K. S. Ramajja, [76], i inni, do roztworów kauczuku — B. A. Dogadkin, [77], do masy torfowej — M. P. Wołarowicz oraz N. N. Kułakow, [78], itd.

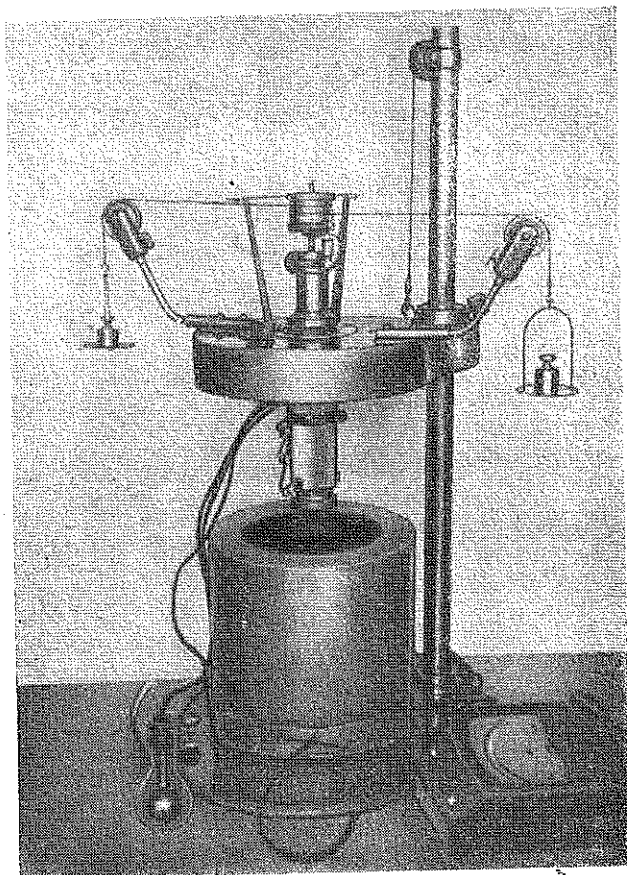
(b) Metoda właczania stożka, którą teoretycznie podbudowali P. A. Riebindier wraz z B. J. Jampolskim i N. N. Siemienienniko, [79]. Można za jej pomocą określać graniczne naprężenie ścinające układów rozproszonych. Do torfu o zmniejszonej wilgotności zastosowali ją M. P. Wołarowicz i S. N. Markow, [80].



Rys. 8. Schemat wiskozymétru obrotowego RW-4 do określania granicznego naprężenia ścinającego i lepkości plastycznej stężonych układów rozproszonych

(c) Metoda opadania kulki, stosowana do masy torfowej, która jednak nie nadaje się do układów rozproszonych, jak to wykazał N. N. K u-
ł a k o w, [81].

(d) Metoda drgań, która również — jako niestacjonarna — nie bar-
dzo jest przydatna do badań reologicznych.



Rys. 9. Widok ogólny wiskozymetru obrotowego RW-7 do badania lepkości smarów w obszarze niskich temperatur (do 60°C) oraz bitumów w temperaturach do 180°C. Górny walec przyrządu i układ rotacyjny są wysunięte z termostatu

II. Metody różnicujące (dyferencjalne) pozwalają bezpośrednio obserwować odkształcenia zachodzące w każdej chwili i w każdym punkcie płynącego układu rozproszonego. Innymi słowy, dają one możliwość ustalania pola i prędkości odkształceń, a niekiedy i pola naprężeń. Warunek

jednorodności pól nie jest tu tak ważny, choć jest również wielce pożą-
dany. Istotne jest to, że metody dyferencjalne przydają się do badania
skomplikowanych przypadków przepływu układów rozproszonych.

1. Poniżej omawiamy różnicujące metody niejednorodne.

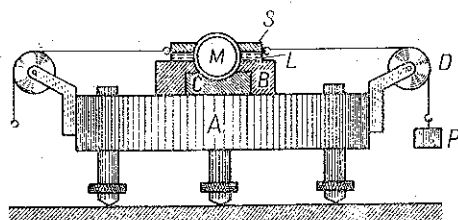
(a) Rozkład prędkości na powierzchni układu rozproszonego można
obserwować w przyrządzie z walcem obrotowym (por. wyżej rys. 5;
M. P. Wołarowicz i D. M. Tołstoj, [28]; G. I. F u k s, [82]). Dobrze
są przy tym rozgraniczone strefy od-
kształceń plastycznych od odkształ-
ceń sprężystych, gdzie naprężenia nie
przekraczają granicznego naprężenia
scinającego.

(b) Rozkład prędkości przepływu
przez rury określali metodą kontak-
tu elektrycznego M. P. Wołaro-
wicz, N. N. Kułakow, K. I. Sa-
marina, E. P. Siemienski
i N. D. Biezzubow, [83]; badania
przeprowadzano nad masą torfową
zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i bezpośrednio w przedsię-
wzięciach torfowych, używając rur o średnicy do 570 mm. M. P. Wo-
łarowicz, D. M. Tołstoj i J. P. Łoszałow a badali meto-
dą optyczną rozkład prędkości podczas wygniatania smarów gęstych
z rurek, [84].

(c) Aby móc badać pola i prędkości odkształceń w układach nieprze-
źroczystych, zwłaszcza podczas przepływu przez rury, M. P. Wo-
łarowicz opracował metodę prześwietlania rentgenowskiego, którą
zastosowano ponadto do badań nad kinematyką przepływu mas rozpro-
szonych w modelach części maszyn: ślimaka, stożka itd. (M. P. Wo-
łarowicz, T. J. Gorazdowski, N. W. Łazowska, S. N. Mar-
kow, [80], [85]).

(d) M. P. Wołarowicz i Ł. I. Korczemkin, [86], badali
pod mikroskopem granice strefy sprężystej i plastycznej podczas prze-
pływu częściowo wykrystalizowanych skał stopionych, obserwując orien-
tację kryształów w szlifach, przygotowanych po uprzednim zahartowa-
niu, [86].

(e) Metodykę zdjęć mikrofilmowych opracował G. W. Winograd
ow, [87]. W szczególności fotografował w świetle spolaryzowanym
procesy przepływu gęstych smarów przez kapilarę płaską. Metoda jest
dogodna do badania mikrokryształicznych przezroczystych układów. Po-
zwala na ustalenie pola naprężeń.

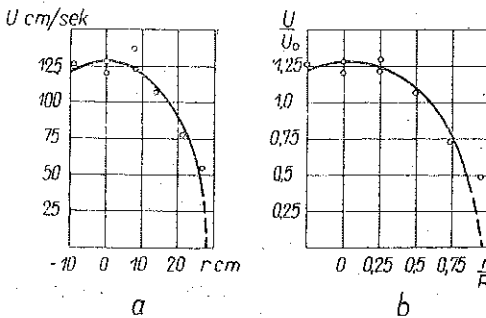


Rys. 10. Schemat przyrządu D. M. Tołstoja

S i B - szklane lub stalowe płytki równoległe,
L - badany układ rozproszony, M - mikroskop
do odczytów na podstawie C, A - płyta stalowa,
D - bloki, P - ciężar

(f) M. M. K u s a k o w i A. N. K i s l i n s k i, [88], opracowali swoistą metodę dwuwymiarową, która pozwala na podstawie jednego doświadczenia określić zależność lepkości oleju smarowniczego od temperatury, dzięki obserwowaniu prędkości opadania kulki w oleju w polu ustalonym o zmiennej lepkości. Zmienność ta występuje wskutek różnicy temperatur oleju w części górnej i dolnej walca.

Dla przykładu podajemy na rys. 11 rozkład prędkości przepływu, uzyskany w drodze eksperymentalnej. Badano, [83], uwodnioną masę torfową o wilgotności około 95%, przepływającą przez rurę o średnicy 57 cm. Rys. 11a przedstawia związek pomiędzy prędkością, u , i odległością, r , od osi rury. Ten sam zaś rozkład przedstawiony jest na rys. 11b we współ-



Rys. 11. Rozkład prędkości przepływu uwodnionej masy torfowej przez rurę o średnicy 670 mm. Rozkład ustalono eksperymentalnie za pomocą sond elektrodowych

rzędnych bezwymiarowych, przy czym R przedstawia promień rury, a u_0 średnią prędkość przepływu masy uwodnionej.

Otrzymane za pomocą prześwietlenia rentgenowskiego wyniki badań, [85], nad przepływem układów rozproszonych zobrazowane są na rysunkach 12, 13 i 14. Rysunek 12 przedstawia przepływ smaru gęstego przez rurę o przekroju kołowym. Jak to widać z kolejnych zdjęć a , b i c , wykonanych w odstępach 15 i 7,5 min, od-

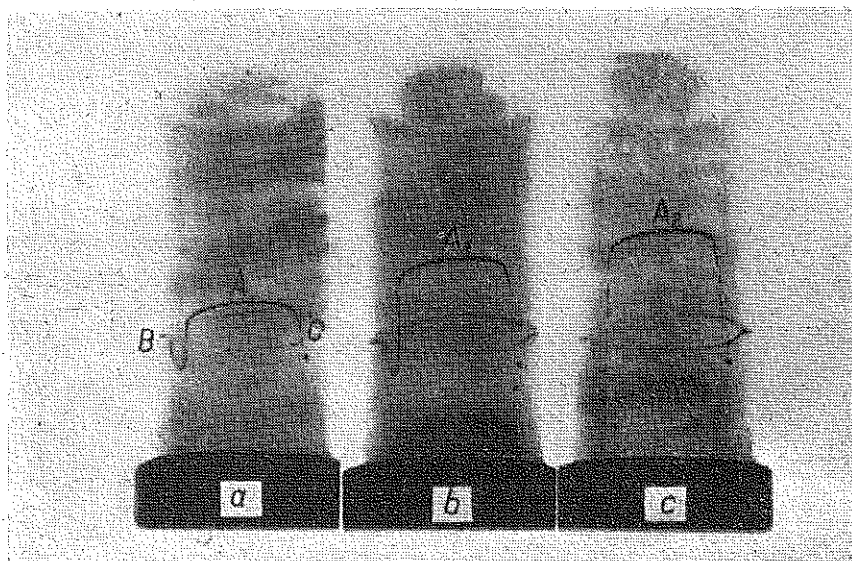
kształcenie smaru dokonywa się tylko w bliskości ścianek rury. Natomiast w środku rury pasmo siarczanu barowego, A , A_1 i A_2 , nie odkształca się wcale. Środkowa część smaru, gdzie naprężenie ścinające jest mniejsze od granicznego, θ , przesuwa się jak jednolity «sztywny» walec. Na rys. 13 podajemy zdjęcia procesu odkształcenia staków torfu (w modelu): podług odkształceń linii punktowanych z drobnych opiłków ołowianych można dobrze rozgraniczyć strefy odkształceń sprężystych i plastycznych. Rysunek 14 przedstawia przepływ torfu o wilgotności 84,5% przez zgiętą pod kątem 90° rurę o średnicy 16 cm. Kolejne zdjęcia A , B i C , uwiadczniając przesuwanie się wskaźników ołowianych, pozwalają wnioskować o charakterze odkształceń.

2. W dalszym ciągu przedstawimy jednorodne metody różnicujące.

(a) Sposoby obserwacji opisane w punktach (a), (b) oraz (e) poprzedniego paragrafu można, oczywiście, stosować również do przepływu o jednorodnych polach.

(b) Przyrząd D. M. T o ł s t o j a, [61], z pierścieniami płaskimi (por. integralne metody jednorodne) może być także stosowany w metodzie dyferencjalnej.

(c) Metodą zdmuchiwania (B. W. D i e r i a g i n i M. M. K u s a k o w ze współpracownikami, [89]) można badać objętościowe anomalne własności lepkie smarów (układy przezroczyste) w cienkich warstwach, tuż przy stałych ściankach.



Rys. 12. Zdjęcia rentgenowskie procesu przepływu smaru gęstego przez rurę o przekroju kołowym

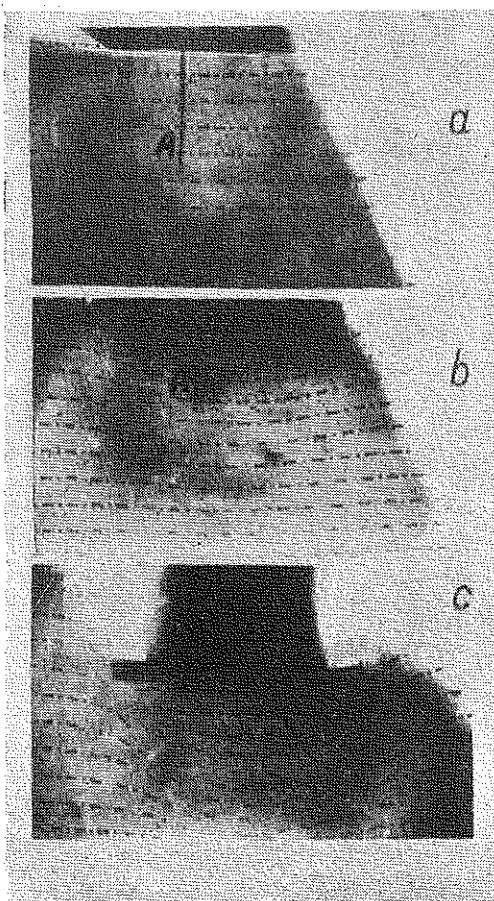
(d) D. M. T o ł s t o j, [69], opracował metodę różnicującą, pozwalającą na posługiwanie się przyrządem ze stycznym przesuwem płytki poziomej:

Należy zauważyć, że na stałych ściankach przyrządów reologicznych, stykających się z układami rozproszonymi, można obserwować poślizg, ponieważ przy tych ściankach wytwarza się często warstwa ośrodka dyspersyjnego. Mimo to rozwiązania zagadnień lepko-plastycznego przepływu na podstawie równania (3) uwzględniają takie warunki brzegowe, przy których substancja przylega do powierzchni stałych. Już N. M. P i e t r o w, [3], [13], zastanawiał się nad możliwością poślizgu cieczy po ściankach stałych. Jednakże można przyjąć, zachowując przy tym bardzo dużą ścisłość, że poślizgu cieczy po powierzchniach stałych nie ma.

Aby uniknąć poślizgu układów rozproszonych, powierzchnie stałe przyrządów reologicznych (walce, płytki itp.) można uczynić chropowatymi, co w wielu przypadkach daje dobre wyniki, [28], [29], [69], [72]. Prowadząc badania wiskozymetryczne można niejednokrotnie wyeliminować efekt poślizgu układów rozproszonych w drodze obliczeń teore-

tycznych, [3], [47], [78], [81], [80]. Systematyczne badania teoretyczne i praktyczne nad zagadnieniem poślizgu przysciennego układów rozproszonych przeprowadził D. M. Tołstoj, [69], [70].

C. Przykłady badania reologicznego układów rozproszonych. Parametry substancji lepko-plastycznej, wchodzące w skład równania (3), mianowicie graniczne naprężenie ścinające, Θ , oraz lepkość plastyczna, η_{pl} , pozwalają badać strukturę układów rozproszonych. Szereg rozpraw P. A. Riebindiera i jego współpracowników, [91], poświęcony jest tym zagadnieniom mikroreologii. Różny sens mikroreologiczny tych dwóch parametrów przepływu lepko-plastycznego, Θ i η_{pl} , widoczny jest z wykresów rys. 15, który został zapożyczony z pracy M. P. Wołarowicza i D. M. Tołstoja, [92]. Tak więc dodanie NaOH, peptyzującego zawiesinę, zmniejsza znacznie wartość Θ i η_{pl} . Natomiast dodanie NaCl wywołującego koagulację, zmniejsza Θ w stopniu nieznacznym, podwyższając jednocześnie lepkość plastycz-

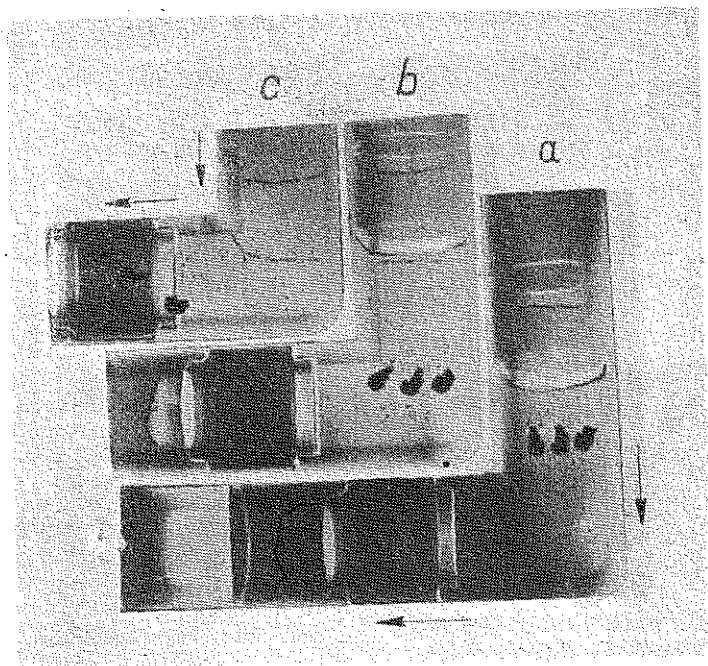


Rys. 13. Zdjęcia rentgenowskie procesu odkształcenia stoków z torfu

ną zawiesiny. Próby obliczeń grubości warstewki oleju wazelinowego w zawieszynie miki koloidalnej, [62], wywołującej graniczne naprężenie ścinające, dały w wyniku wartość kilku mikronów. Odpowiada to mniej więcej grubościom cienkich warstewek cieczy, posiadających sprężystość postaci, zgodnie z bezpośrednimi pomiarami wykonanymi przez B. W. Dieriągina, [93].

W różnych układach rozproszonych jeden z dwóch parametrów, Θ lub η_{pl} , odgrywa zazwyczaj główną rolę. W takich wysoce lepkich materiałach

jak bitumy, granicznemu naprężeniu ścinającemu przypada często rola drugorzędna, podczas gdy rolę główną wypełnia lepkość, osiągająca wartość dziesiątków i setek tysięcy, a nieraz milionów poise'ów i więcej, [67].

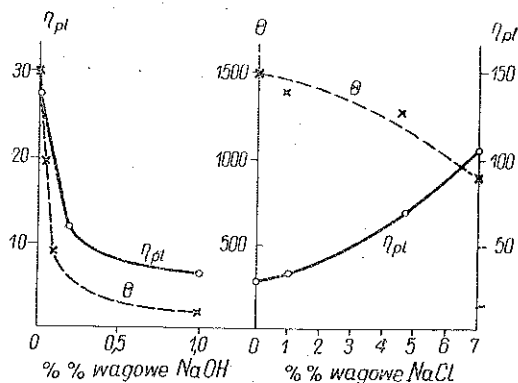


Rys. 14. Zdjęcia rentgenowskie procesu przepływu torfu przez rurę zgiętą pod kątem 90°

Przeciwnie ma się rzecz z wieloma układami rozproszonymi o małej lepkości ośrodka dyspersyjnego, zwłaszcza zaś z zawiesinami wodnymi. W roli głównej występuje tu Θ , stanowiąc nader charakterystyczny parametr dla układów tego rodzaju. W stosunku do smarów gęstych z podkładem o małej lepkości wykazali to w szeregu przypadków P. A. R i e b i n d i e r, [94], i D. S. W i e l i k o w s k i, [95].

K. A. C a r i e w i c z i A. I. M a ł y s z e w, [96], zalecili do obliczeń przepływu roztworów gliny przez rury wzór, obejmujący tylko graniczne naprężenie ścinające. Znaczący to, że straty ciśnienia w rurach zależą zasadniczo od Θ i w pierwszym przybliżeniu nie zależą od lepkości plastycznej zawiesin gliny. M. P. W o ł a r o w i c z, [83], uzasadnił analogiczny wzór w zastosowaniu do przepływu przez rury uwodnionej masy torfowej z zawartością substancji suchej w granicach od 8 do 20%. Próby, mające na celu określenie rozkładu prędkości w rurociągach

o średnicy od 44 do 75 cm, potwierdziły przypuszczenie, że strata ciśnienia tylko w nikłym stopniu zależy od lepkości plastycznej roztworów, a natomiast określana bywa wartością granicznego naprężenia ścinającego masy uwodnionej.



Rys. 15. Zależność granicznego naprężenia ścinającego (θ dyn/cm²) oraz lepkości plastycznej (η_{pl} w poisach) od ilości dodanych elektrolitów. Badano kaolin głuchowiecki o wilgotności 55%

Jeśli chodzi o zaprawy budowlane (wapno i inne) mające wysoką wartość η_{pl} , to należy — jak to wykazały doświadczenia W. P. Łobanowa, [65], — do obliczeń przepływu przez rury korzystać ze wzoru Buckinghama, [19], [26], z oboma parametrami przepływu lepko-plastycznego, tj. z lepkością plastyczną i z granicznym naprężeniem ścinającym.

Graniczne naprężenie ścinające jest wielkością bardzo charakterystyczną dla torfu o zmniejszonej wilgotności, czyli z zawartością od 92 do 75% wody, [64].

N. W. Łazowska wykazała, między innymi, że jeśli wilgotność torfu obniża się z 83 do 79%, to graniczne naprężenie ścinające, θ , wzrasta trzykrotnie, podczas gdy η_{pl} zwiększa się tylko nieznacznie, bo zaledwie o 15% (por. rys. 16). Okazało się ostatecznie, że wartości θ określają zależność pomiędzy wydatkiem torfu przepływającego przez kształtkę stożkową a ciśnieniem, [97]. Natomiast η_{pl} nie ma pod tym względem praktycznego znaczenia. Ponadto M. P. Wołarowiczowi wraz z S. N. Markowem, [80], udało się ustalić, że graniczne naprężenie ścinające jest nader przydatne do charakteryzowania stopnia przeróbki torfu w różnych mechanizmach przetwórczych, gdyż wiąże się to z naruszeniem jego struktury.

W innych badaniach znaleziono związek pomiędzy własnościami strukturalno-reologicznymi roztworów klejowych a trwałością błonki klejowej, [98]. Stwierdzono, że gdy rozpuścimy kauczuk po przewalcowaniu, to lepkość roztworów jest znacznie mniejsza niż roztworów kauczuku niewalcowanego, graniczne zaś naprężenie ścinające, θ , spada przy tym do zera. Jednocześnie trwałość błonki klejowej kauczuku walcowanego jest o 50% mniejsza niż kauczuku niewalcowanego. Zjawiska powyższe tłumaczą się tym, że walcowanie pociąga za sobą zmianę struktury cząsteczek kauczuku, powodując mianowicie rozpad cząsteczek i zmniejszenie długości łańcuchów cząsteczkowych. Zmiany takie burzą

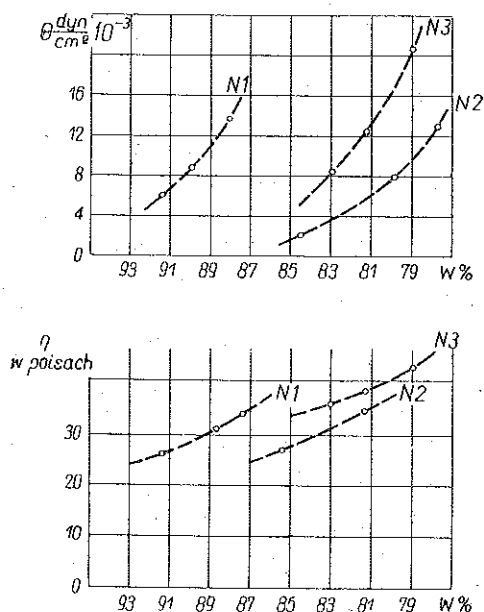
strukturę roztworów, wskutek czego Θ spada do zera, a odpowiednio zmniejsza się i trwałość błonki klejowej.

W referacie niniejszym nie rozpatrywaliśmy ważnych zjawisk sprężysto-kinetycznych, powstających w układach rozproszonych, gdy naprężenia są mniejsze od granicznych naprężeń ścinających, Θ . Badania tego rodzaju, kontynuujące prace F. N. Szwidowa, prowadzono na szeroka skalę w laboratoriach P. A. Riebindiera, [57], [99], G. W. Winogradowa, [58], [74], A. A. Trapieznikowa, [59], [100], M. P. Wołarowicza, [50], [53], [101], i innych.

Na zakończenie należy jedynie pokrótce wspomnieć o zagadnieniu badań nad zjawiskami tyksootropycznymi w układach rozproszonych. Podczas przepływu lepkoplastycznego układu w obszarze, w którym spełnione jest równanie (3) F. N. Szwidowa, tyksootropia jest praktycznie wykluczona, ponieważ struktura tyksootropiczna układu uległa już zazwyczaj całkowitemu zburzeniu. W szeregu doświadczeń przemierzaliśmy uprzednio układy (powodując w ten sposób zburzenie tyksootropiczne struktury), zanim przystępowaliśmy do pomiaru parametrów Θ i η_{pl} . Łatwo to uczynić stosując wiskozymetr obrotowy.

Jednak procesy tyksootropyczne wnoszą dużo komplikacji do badań zjawisk sprężysto-kinetycznych w układach rozproszonych, w których panują małe naprężenia ścinające.

Specjalne badania zjawisk tyksootropii można wykonywać dwojako: już to obserwując odbudowę struktury po jej uprzednim zburzeniu w sposób mechaniczny, już to obserwując proces niszczenia struktury w czasie jej mieszania, gdy wzrasta stopniowo gradient prędkości dv/dz , albo — co na jedno wychodzi — naprężenie ścinające, τ . W obu tych przypadkach najdogodniej charakteryzować trwałość struktury tyksootropicznej za pomocą granicznego naprężenia ścinającego. Pierwszą metodę z powodzeniem stosował P. A. Riebindier i J. J. Siega-



Rys. 16. Zależność granicznego naprężenia ścinającego Θ oraz lepkości plastycznej η_{pl} torfu od zawartości wody według danych N. W. Łazowskiej, otrzymanych za pomocą wiskozymetru obrotowego RW-4

ł o w a, [57], wraz ze współpracownikami. Doświadczenia te pozwoliły wywieść szereg wniosków co do istnienia w różnych układach rozproszonych struktury kondensacyjnej bądź też rozdrobnionej.

Drugi kierunek badań rozwijał M. P. W o ł a r o w i c z z W. Ł. W a ł d m a n e m, [66], [102], [103]. Przedmiotem ich były oleje smarownicze w obszarze niskich temperatur. Do pomiarów posługiwano się wiskozymetrem RW-7. Udało się przy tym wyjaśnić, że struktury tyksotropiczne typu siatki z parafin, tworzące się w olejach podczas ostygnięcia, są bardzo nietrwałe. Układy te są bardzo chwiejne pod względem tyksotropicznym, w każdym zaś razie odbudowują swą strukturę powoli. Ponadto graniczne naprężenie ścinające, które pojawia się w olejach smarowniczych po ostygnięciu, ulega całkowitemu zniszczeniu podczas mechanicznego mieszania takiego układu. Wobec tego oleje, posiadając anomalię lepkości po ostudzeniu i naruszoną strukturę po izotermicznym mieszaniu, stają się w niskich temperaturach idealnymi lepkiemi cieczami newtonowskimi. W związku z tym, obliczając początek przesuwu tłoka w cylindrze silnika w niskiej temperaturze, [104], należy uwzględniać graniczne naprężenie ścinające oleju smarowniczego. Natomiast podczas dalszego ruchu należy uwzględniać tylko lepkość oleju, ponieważ jego struktura jest już naruszona. Jeśli chodzi o ruch ustalony wału w łożysku w niskich temperaturach, jak to wykazały doświadczenia M. P. W o ł a r o w i c z a, [105], to można stosować zwykle równania hydrodynamicznej teorii smarowania.

Wzmianki powyższe mogą służyć za przykład tego, w jaki sposób badania reologiczne układów rozproszonych stosuje się do celów praktycznych.

Bibliografia

[1] M. W. Ł o m o n o s o w, *Trudy po fizikie i chimji 1747-1752 gg.*, Dzieła wszystkie pod red. S. I. Wawilowa, T. P. Krawca i A. A. Jelisiejewa, t. 2, 1951; W. P. B a r z a k o w s k i i N. M. R a s k i n, *Oborudowanje chimiczeskoj laboratorji M. W. Łomonosowa*, «Łomonosow», Zbiór artykułów pod red. S. I. Wawilowa, wyd. AN ZSRR, 3, 191, 1951; A. W. T o p c z i j e w, M. W. Łomonosow — *wielikij russkij uczonyj*, *Priroda* 2, 3 (1952).

[2] D. I. M i e n d i e l e j e w, *O soprotiwlenji židkostiej i o wozduchoplawanji*, Petersburg, 1880, *Zurn. Russk. Fiz.-chim. obszczestwa*, 12, 1-2 (1880); *Sobranje sočinenij*, wyd. AN ZSRR, t. 7, 1946.

[3] N. P. P i e t r o w, *Trienje w maszinach i wlijanje na niewo smazywajuszczej židkosti*, *Inż. žurn.*, 27, 1-4 (1883); *Gidrodinamiczeskaja teorija smazki*, *Prace wybrane*, wyd. AN ZSRR, 1948.

[4] F. N. S z w i e d o w, *Recherches expérimentales sur la cohésion de liquides*, I, *Rigidité de liquides*, *Jurn. de phys.*, 8 (2), 341, 1889; II, *Viscosité de liquides*, 9 (2), 34, 1890; *Rapportes présentés au Congrès international de physique*, Paryż, 1, 478, 1900.

[5] N. S. Kurnakow, *Sobranje izbrannych rabot*, Chimteorietizdat, t. 1, 1938; t. 2, 1939.

[6] D. Bernoulli, *Dissertatio de actione fluidorum in corpore solida et motu solidorum in fluidis*, p. prima, Commentarii Academiae Scientiarum Petropolitanae ad annum MDCCXXVII, 2, 304, 1729, i inne prace; W. I. Smirnow, 250-letje so dnia roždienja D. I. Bernoulli, *Wiestnik AN ZSRR*, 104, 3 (1950).

[7] L. Euler, *Delucidationes de resistentia fluidorum*, Novi commentarii Academiae Scientiarum Petropolitanae, 7, (1760-1761), i inne prace; A. N. Krylow, *Leonard Euler*, *Sbornik statiej k 150-letju so dnia smierti Eulera*, wyd. AN ZSRR, 1935.

[8] I. S. Gromieka, *Sobranje soczinienij*, pod red. P. J. Koczinoj, wyd. AN ZSRR, 1952; B. N. Jurjew, *Aerodinamika*, *Wielka Encyklopedia Radziecka*, wyd. 2, 3, 593, 1950.

[9] O. Reynolds, *Phil. Trans.*, Londyn, 174, 935, 1883.

[10] N. J. Żukowski, *Połnoje sobranje soczinienij*, Gławn. ried. awiac. litier., 1935-1937; *Sobranje soczinienij*, *Gostiechizdat*, 1948-1950.

[11] S. A. Czapljgin, *Gidrodinamika i aerodinamika*, *Dziewła zebrane*, t. 2, 1948.

[12] N. J. Żukowski, *Nowyje naucznyje zawojewanja w teorji soprotiwlenja židkostiej*, *Dniewnik 13-wo Sjezda russkich jestiestwoispytatielej i wraczej*, 10 (1914).

[13] N. P. Pietrow, *Opisanje i riezultaty opytow nad trienjem židkostiej i maszin*, *Izw. Tiechnologiceskowo Inst. za 1885 g.*, Petersburg 1886; M. P. Wołarowicz, N. P. Pietrow — *osnowopolożnik gidrodinamiczeskoj teorji smazki maszin*, *Trudy 2-oj Wsies. Konf. po trienju i iznosu w maszinach*, 3, 5, (1949).

[14] J. L. M. Poiseuille, *Mém. Acad. Sci.*, Paryż, 9, 433, 1846; *Rhéologie*, *Mémoires* (redaktor E. C. Bingham), 1 (1940); M. P. Wołarowicz, *Raboty Poiseuilla o tieczenji židkostiej w trubach (k stoletju so wriemieni opublikowanja)*, *Izw. AN ZSRR, sier. fiz.*, 11, 8, 1 (1947)

[15] J. C. Maxwell, *Phil. Mag.* (4), 45, 133, 1868.

[16] B. P. Wiejnberg, *Wlijanje timpieratury na wnutriennieje trienje wara i asfalta*, *Žurn. Russk. Fiz.-chim. Obszczestwa*, 44, 201, 4 (1912).

[17] B. P. Wiejnberg, *O wnutriennem trienji lida*, Petersburg 1906.

[18] B. P. Wiejnberg ze współpracownikami, *Žurn. Russk. Fiz.-chim. Obszczestwa, fiz. otd.*, 36, 47, 2 (1904); 44, 3, 1 (1912); 46, 66, 2 (1914) i inne prace.

[19] E. C. Bingham, *Fluidity and Plasticity*, New York 1922.

[20] M. P. Wołarowicz i A. M. Gutkin, *Žurn. tiechn. fiz.*, 16, 321, 3 (1946); A. M. Gutkin, *Trudy 2-oj Wsies. Konf. po trienju i iznosu w maszinach*, wyd. AN ZSRR, t. 1, 31, 1947.

[21] H. Henckly, *Zeitschr. f. angew. Math. u. Mech.*, 5, 115, 1925.

[22] A. A. Iljuszyn, *Trudy Konf. po pļasticzeskim dieformacijam*, wyd. AN ZSRR, 1938.

[23] G. G. Diemieitc, *Opytnoje issledowanje miechaniczeskich swojstw masiel i kołloidow*, *Zapiski matiem. otd. Noworossijskowo Obszczestwa Jestiestwoispytatielej*, 9, 193, Odessa 1889; *Słuczajnoje dvojnoje prietomlenje swieta w židkostiach*, *Žurn. Russk. Fiz.-chim. Obszczestwa, fiz. otd.*, 34, 505, 9 (1902).

[24] N. A. Gieziechus, *Uprugoje poslediejstwje i drugije schodnyje s nim fiziczeskije jawlenja*, *Žurn. Russk. Fiz.-chim. Obszczestwa, fiz. otd.*, 14, 287, 7 (1882); *Iskluczitielnyje swojstwa kauczuka, tamże*, 15, 103, 4 (1883) i inne prace.

- [25] J. C. Maxwell, *Theory of Heat*, 1887.
- [26] E. Buckingham, *Proc. Amer. Soc. Test. Mater.*, 21, 1154, 1921.
- [27] M. Reiner i R. Rivlin, *Koll. Zeitschr.*, 41, 1, 1927.
- [28] M. P. Wołarowicz i D. M. Tołstoj, *Żurn. fiz.-chim.*, 4, 815, 6 (1933).
- [29] D. M. Tołstoj, *Żurn. fiz.-chim.*, 5, 28, 1934.
- [30] A. A. Iljuszyn, *Uczonyje zapiski Mosk. Gos. Uniwier.*, *Miechanika*, 39 (1940).
- [31] P. K. Szczipanow, *Żurn. tiechn. fiz.*, 19, 1211, 10 (1949).
- [32] M. P. Wołarowicz i A. M. Gutkin, *Koń. żurn.*, 10, 329, 5 (1948).
- [33] N. W. Tiabin, *Koń. żurn.*, 13, 55, 1 (1951).
- [34] M. P. Wołarowicz i A. M. Gutkin, *Koń. żurn.*, 15, 155, 2 (1953).
- [35] M. P. Wołarowicz i P. K. Szczipanow, *Koń. żurn.*, 11, 384, 6 (1949); P. K. Szczipanow, *Koń. żurn.*, 11, 363, 5 (1949); *Trudy Mosk. Torfiarowo Inst.*, 2, 122, 1953.
- [36] N. W. Tiabin, *Trudy Kazanskoj Chim.-tiechnoł. Inst.*, 52, 14 (1949).
- [37] R. I. Sziszczenko, *Gidraulika glinistych rastworow*, *Aznieftieizdat*, Baku 1951.
- [38] N. W. Tiabian, *Koń. żurn.*, 14, 270, 4 (1952).
- [39] A. Nádaı, *Plasticznost'*, tłum. pod red. L. S. Lejbienzona, *Gostiechizdat*, 1936; wyd. 2, *Theory of Flow and Fracture of Solids*, New York 1950.
- [40] W. W. Sokołowski, *Plasticznost'*, wyd. AN ZSRR, 1946; wyd. 2, 1951.
- [41] A. A. Iljuszyn, *Plasticznost'*, *Gostiechizdat*, 1948.
- [42] W. D. Kuzniecowa, *Fizika twierdowo tiela*, t. 5, Tomsk 1949.
- [43] *Tieorja plasticznosti*, *Sbornik pieriewodnych statiej*, pod red. J. N. Rabotnowa, *Gos. izdat. inostr. lit.*, 1948.
- [44] *Trudy Sowieszczanija po wiazkosti židkostię i kolloidow*, t. 1, 1941; t. 2, 1944.
- [45] *Trudy 2-oj Wsies. Konf. po trienju i iznosu w maszinach*, t. 2, 1948; t. 3, 1949.
- [46] R. Houwink, *Elasticity, Plasticity and Structure of Matter*, Cambridge 1937.
- [47] G. W. Scott Blair, *Introduction to Industrial Rheology*, Londyn 1938.
- [48] G. W. Scott Blair, *A Survey of General and Applied Rheology*, Londyn 1945; wyd. 2, Londyn 1949.
- [49] M. Reiner, *Deformation and Flow*, Londyn 1949.
- [50] M. P. Wołarowicz, *O primienieniji metodow rieologii w piszczewoj promyszlennosti*, *Kołloidy w piszczewoj promysz.*, *Piszczepromizdat*, *Sbornik* 2, 40, 1949.
- [51] G. I. Fuks, *Wiazkost' i plasticznost' nieftieproduktow*, *Gostoptiechizdat*, 1951.
- [52] K. Cariewicz, R. Sziszczenko i B. Baklanow, *Glinistyje rastwory w burieniji*, *Aznieftieizdat*, Baku-Moskwa 1935.
- [53] M. P. Wołarowicz i R. A. Branopolska, *Issledowanje fiziko-miechaniczeskich swojstw pszenicznowo tiesta*, *Piszczepromizdat*, 1940.
- [54] C. A. Coulomb, *Mém. Inst. National* 3, 261, Paryż 1798.
- [55] M. P. Wołarowicz, *Trudy Inst. Prikl. Minieralogiji*, 66 (1934); *Trudy Poligraficz. Inst. OGIZ'a*, 261, 5 (1937).
- [56] M. P. Wołarowicz, *Zawod. Labor.*, 832, 9 (1945).
- [57] P. A. Riebindier i J. J. Siegałowa, *Koń. żurn.*, 10, 223, 3 (1948); *Dokł. AN ZSRR*, 71, 85, 1 (1950).

- [58] G. W. Winogradow i K. I. Klimow, Dokł. AN ZSRR, 57, 911, 1947; Żurn. tiechn.-fiz., 18, 355, 3 (1948); Trudy 2-oj Wsies. Konf. po trienju i iznosu w maszinach, 3, 300, 1949.
- [59] A. A. Trapieznikow i J. M. Szlosberg, *Sbornik Nowyje metody fiziko-chimicznych issledowanij powierzchniowych jawlenij*, 39, 1 (1950).
- [60] T. J. Gorazdowski, Zawod. Labor., 554, 5 (1949); 373, 3 (1951).
- [61] D. M. Tołstoj, Dokł. AN ZSRR, 85, 1089, 5 (1952).
- [62] M. P. Wołarowicz i I. S. Jerochin, Żurn. fiz.-chim., 12, 277, 2-3 (1938).
- [63] M. P. Wołarowicz i J. P. Łoszakowa, Kołł. żurn., 8, 127, 3 (1946).
- [64] M. P. Wołarowicz i T. M. Kuźmiska: patrz. N. N. Kułakow, *Wwiedjenje w fiziku torfa*, Gosenergoizdat, 1947.
- [65] W. P. Łobanow, Kołł. żurn., 12, 352, 5 (1950).
- [66] M. P. Wołarowicz, *Wiazkost' smazocznych masiel pri nızkich temperaturach*, wyd. AN ZSRR, 1944; M. P. Wołarowicz i W. Ł. Waldman, *Trienje i iznos w maszinach*, Sbornik, 2, 80, 1946.
- [67] N. W. Michajłow, *Krowielnyje i gidroizolacjonnyje pokrytja*, Maszstrojizdat, 1950; M. F. Nikiszina, Trudy Dorożnowo Naucznoissled. Inst., Dorizdat, 1949, str. 38.
- [68] B. P. Wiejnberg, Żurn. Russk. Fiz.-chim. Obszczestwa, fiz. otd. 44, 514, 9 (1912); W. D. Dubiecki, tamże, 45, 519, 9 (1913).
- [69] D. M. Tołstoj, Kołł. żurn., 10, 1933, 2 (1948).
- [70] M. P. Wołarowicz, Trudy Poligraficzeskowo Inst. OGIZ'a, 5, 299, 1937.
- [71] D. S. Wielikowski, Trudy 1-oj Wsies. Konf. po trienju i iznosu, 1, 394, 1939.
- [72] S. J. Wiejler i P. A. Riebindier, Dokł. AN ZSRR, 49, 354, 5 (1945).
- [73] M. M. Kusakow, Izw. AN ZSRR, Otd. Tiechn. Nauk, 672, 10-11 (1944).
- [74] G. W. Winogradow i W. P. Pawłow, Dokł. AN ZSRR, 58, 1391, 7 (1947); Trudy 2-oj Wsies. Konf. po trienju i iznosu w maszinach, 3, 311, 1949; Sbornik *Nizkotiempieraturnyje swojstwa nieftieproduktow*, Gostoptiechizdat, 1949, str. 61; A. A. Konstantinow i G. W. Winogradow, Dokł. AN ZSRR, 86, 749, 4 (1952).
- [75] G. I. Fuks i J. Smolina, Trudy 2-oj Wsies. Konf. po trienju i iznosu w maszinach, 2, 499, 1948.
- [76] K. S. Ramajja, Trudy 1-oj Wsies. Konf. po trienju i iznosu w maszinach, 1, 417, 1939.
- [77] B. A. Dogadkin, *Chimja i fizika kauczuka*, Goschimizdat, 1947.
- [78] M. P. Wołarowicz i N. N. Kułakow, Izw. AN ZSRR, Otd. Matem. i Jestiestw. Nauk, 1331, 10 (1935).
- [79] P. A. Riebindier i B. J. Jampolski, Kołł. żurn., 10, 466, 6 (1948); P. A. Riebindier i N. N. Siemienienko, Dokł. AN ZSRR, 64, 835, 6 (1949).
- [80] M. P. Wołarowicz i S. N. Markow, Zawod. Labor., 1461, 12, (1951); Żurn. Torfianaja promysl., 23, 10 (1951).
- [81] N. N. Kułakow, Kołł. żurn., 3, 217, 3 (1937); Trudy Sowieszczanja po wiazk. židk. i kołł., 1, 391, 1941.
- [82] G. I. Fuks, Dokł. AN ZSRR, 66, 1125, 1949.

- [83] M. P. Wołarowicz ze współpracownikami, Żurn. tiechn. fiz., 14, 448, 7-8 (1944); Kołł żurn., 8, 9, 1-2 (1946).
- [84] M. P. Wołarowicz, D. M. Tołstoj i J. P. Łoszakowa, Trudy 2-oj Wsies. Konf. po trienju i iznosu w maszinach, 1, 119, 1947; D. M. Tołstoj, tamże, s. 130.
- [85] M. P. Wołarowicz, Kołł żurn., 9, 325, 5 (1947); M. P. Wołarowicz i T. J. Gorazdowski, tamże, 11, 1, 12 (1949); N. W. Łazowska, tamże, 11, 77, 2 (1949); M. P. Wołarowicz, Trudy Mosk. Torf. Inst., 112, 2 (1953); T. J. Gorazdowski i S. A. Riegirier, Kołł żurn., 14, 85, 2 (1952).
- [86] M. P. Wołarowicz i Ł. I. Korczemkin, Izw. AN ZSRR, sierja rieologicz., 599, 4 (1938); Trudy Inst. Geologicz. Nauk AN ZSRR, sierja pietrograf., 53, 8 (1940).
- [87] G. W. Winogradow, Dokł. AN ZSRR, 71, 505, 1950.
- [88] M. M. Kusakow i A. N. Kislinski, Trudy 2-oj Wsies. Konf. po trienju i iznosu w maszinach, 3, 276, 1949.
- [89] B. W. Dieriagin, G. Strachowski i D. Małyszewa, Żurn. ekspier. i teoriet. fiz., 16, 171, 2 (1946); B. W. Dieriagin, M. M. Kusakow i K. S. Krym, tamże, str. 179; B. W. Dieriagin, Trudy 2-oj Wsies. Konf. po trienju i iznosu w maszinach, 1, 103, 1947; M. M. Kusakow i E. A. Razumowska, tamże, 1, 111, 1947.
- [90] D. M. Tołstoj, Kołł żurn., 9, 450, 6 (1947); Dokł. AN ZSRR, 67, 495, 3 (1949); Trudy 2-oj Wsies. Konf. po trienju i iznosu w maszinach, 3, 155, 1949.
- [91] P. A. Riebindier, Trudy Sowieszczanija po wiazk. židk. i kołł. 1, 361, 1941; N. N. Sierb-Sierbina, tamże, str. 381; P. A. Riebindier i W. Mokijewski, Dokł. AN ZSRR, 26, 48, 1 (1940); P. A. Riebindier i J. B. Aron, tamże, 28, 804, 9 (1940).
- [92] M. P. Wołarowicz i D. M. Tołstoj, Dokł. AN ZSRR, 557, 9 (1934).
- [93] B. W. Dieriagin, Żurn. fiz.-chim., 3, 29, 1932.
- [94] P. A. Riebindier, N. A. Bogusławska i W. B. Mokijewski, Trudy Sowieszczanija po wiazk. židk. i kołł. 2, 173, 1944.
- [95] D. S. Wielikowski, *Konsistentnyje smazki*, Gostoptiechizdat, 1945.
- [96] K. A. Cariewicz i A. I. Małyszew, Niefert. choz., 18, 9, 1933; Niefert. choz., 1, 34, 1934.
- [97] N. W. Łazowska, Torfianaja Promyszl., 3 (1951); M. P. Wołarowicz i N. W. Łazowska, Dokł. AN ZSRR, 76, 211, 2 (1951).
- [98] M. P. Wołarowicz i Ł. J. Ginzburg, Kołł żurn., 14, 20, 1 (1952); Legkaja Promyszl., 23, 6 (1952).
- [99] P. A. Riebindier, *Sbornik Nowyje metody fiziko-chim. issled. powierchnostnych jawlenij*, Izd. AN ZSRR, 1450; A. S. Kołbanowska i P. A. Riebindier, Kołł żurn., 12, 194, 1950; L. I. Edielman i P. A. Riebindier, tamże, 13, 64, 1951; J. J. Siegałowa, P. A. Riebindier i Ł. N. Sientiurichina, tamże, 13, 401, 1951.
- [100] A. A. Trapieznikow i J. M. Szlosbierg, Kołł żurn., 8, 421, 6 (1946); A. A. Trapieznikow i S. Ch. Zakijewa, tamże, str. 429; A. A. Trapieznikow i W. A. Fiedotowa, Dokł. AN ZSRR, 81, 1101, 6 (1951); 82, 97, 1 (1952).

[101] M. P. Wołarowicz i R. A. Branopolska, Kołł. żurn., 10, 406, 6 (1948) (według prac 1938-1940); T. J. Gorazdowski, Torfianaja Promysz., 14,8 (1949).

[102] W. Ł. Waldman, Żurn. tiechn. fiz., 16, 485, 4 (1946); tamże str. 493; Kołł. żurn., 9, 175, 3 (1947); Trudy 2-oj Wsies. Konf. po trienju i iznosu w maszinach, 2, 491, 1948; 3, 291, 1949.

[103] M. P. Wołarowicz, Sbornik Nizkotiempieraturnyje swojstwa nieftieproduktow, Gostoptiechizdat, 1949, str. 3.

[104] M. P. Wołarowicz, Trudy 2-oj Wsies. Konf. po trienju i iznosu w maszinach, 2, 463, 1948; Sbornik Trienje i iznos w maszinach, 100, 3 (1948).

[105] M. P. Wołarowicz i N. W. Łazowska, Izw. AN ZSRR, Otd. Tiechn. Nauk, 1607, 10 (1948); Sbornik Trienje i iznos w maszinach, 142, 4 (1949).

Резюме

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ

В начале дано определение реологии и описаны ее задачи, а также указаны разнообразные дисперсные системы — легкодеформируемые материалы, с реологическими исследованиями которых приходится встречаться в различных отраслях промышленности.

Далее кратко изложена история развития работ в области реологии в России до Великой Октябрьской социалистической революции, связанная с именами знаменитых русских ученых: В. И. Ломоносова, Д. И. Менделеева, Н. П. Петрова, Ф. Н. Шведова, Н. С. Курнакова и других исследователей.

Затем описан ряд работ советских ученых по исследованию реологических свойств дисперсных систем, причем примеры взяты главным образом из работ автора и его сотрудников. В докладе изложена феноменологическая теория вязкопластичного потока дисперсных систем, основанная на применении уравнений Шведова-Генки-Ильющина. Отмечены решения этих уравнений для ряда задач: течение в трубе круглого и кольцеобразного сечения, а также в плоском капилляре, вращение в зазоре между коаксиальными цилиндрами, вращение вала в подшипнике, продольное смещение цилиндра, течение по наклонной плоскости под действием силы тяжести и т. д.

При изложении экспериментальных работ описаны методы и приборы, как интегральные ротационные и капиллярные вискозиметры, приборы с продольным смещением пластинки и т. д., так и дифференциальные, позволяющие изучать деформации и скорости деформаций во всем объеме испытываемой дисперсной массы. При этом разобраны преимущества приборов, в которых дисперсная система во время испытаний находится в состоянии однородного сдвига.

В докладе приведены некоторые результаты измерений реологических параметров дисперсных систем — пластической вязкости и пре-

дельного напряжения сдвига, а также отмечены попытки молекулярно-коллоидной интерпретации процессов вязко-пластичного течения дисперсных масс.

В заключение приведены примеры применений результатов реологических исследований для различных практических целей.

S u m m a r y

INVESTIGATION OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF DISPERSED SYSTEMS

A definition of rheology is given and the scope of this branch of science is discussed as well as different kinds of dispersed systems, that is, easily deformable materials, which undergo rheological investigations in various industries.

This is followed by a short account of the history of the development of rheology in Russia prior to the revolution, which is linked with such famous names as M. V. Lomonosow, D. J. Mendeleiev, N. P. Petrov, F. N. Shvedov, N. S. Kurnakow and others.

Next, the work of Soviet scientists associated with investigations of rheological properties of dispersed systems, is discussed. The examples used were taken mainly from the works of the author and his co-workers.

The phenomenological theory of viscoplastic flow of dispersed systems, based on the equations of Shvedov - Henc'ky - Illiushin, is presented. The equations in question are discussed in a series of problems and include the following: flow through a circular or annular tube as well as through a flat capillary tube; rotational motion in a narrow space formed by two coaxial cylindrical surfaces; rotation of a shaft in a bearing; longitudinal displacement of a cylinder; gravity flow down a slope, etc.

The methods of investigation are described, including integration methods and instruments (rotation and capillary viscometers, slide plate instruments, etc), as well as differentiation methods, methods permitting the study of the deformation and the rate of deformation considered at any point of the dispersed mass.

The advantages of instruments, in which the dispersed system remains during the test, in a state of homogeneous shear, are discussed.

Some results of measurements of rheological properties of dispersed systems (plastic viscosity, limit shear stress, etc.) are presented and the molecular colloidal interpretation of viscoplastic flow of dispersed masses is discussed.

Finally, the paper brings some examples of practical application of the results obtained by rheological investigation.