

**Вплив органічних речовин на опір тертя в рідинах
 (огляд зарубіжних наукових праць)
 Influence of organic matters is on resistance of friction in liquids
 (review of foreign scientific labours)**

*Присвячується світлій пам'яті доктора
 Фрімана Дж.Р. (J.R. Freeman) – 24 президента
 ASME, засновника свого фонду в 1926 році для
 підтримки досліджень в області гідравліки, а в
 подальшому механіки рідин взагалі*

Передмова

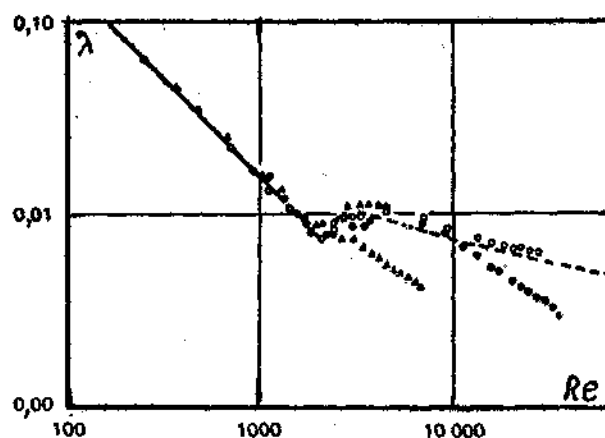
Доктор Фріман, якби він був живий, зацікавився б явищем, яке ми намагалися висвітлити у цьому огляді, тому що тема зачіпає його особистої роботи про опір при течії води в гладких трубах [1] і гідравліці струменів при гасінні пожеж [2]. Але він мабуть не зміг уявити собі, що з'явиться новий підхід до цього питання. Відкриття з наступним пізнанням того факту, що сильно розбавлені полімерні розчини можуть володіти значно меншим в порівнянні з розчинником опором турбулентного тертя, відноситься до початку 60-х років 20-го сторіччя. Результати експериментів з розчинами полімерів, крім можливостей зменшувати опір тертя, є ще і додатковим інструментом, який допомагає вивчати основи гідромеханіки.

Основну увагу в цьому огляді буде спрямоване на властивості турбулентних течій полімерних розчинів. Експериментально було виявлено, що дуже малі концентрації розчиненого високомолекулярного полімеру, порядку декількох частин на мільйон розчинника, можуть зменшити опір тертя в турбулентному потоці до однієї четвертої величини опору чистого розчинника. Тому що в'язкість цих розчинів вимірюна звичайними віскозиметрами, трохи більша, ніж у чистого розчинника, то той факт, що відбувається зменшення турбулентного тертя, здається дивним гідромеханіку. Значно раніше, ніж ця робота, були зроблені оглядові роботи по ефекту зменшення опору Ламлі [3], Паттерсоном, Зайкіним і Родрігесом [4]. Вони корисні для швидкого знайомства з різними сторонами цього питання.

1. Історія питання

Перші із опублікованих робіт з явища зменшення тертя наведені в публікації Томса [5].

Рис.1. Залежність коефіцієнта опору тертя від числа Рейнольдса [6] при течії 0,25% розчину поліметилметакрилату в моноклоробензолі в трубах діаметром: 1) ● – 4,04 мм і 2) ▲ – 1,29 мм і чистого розчинника: 3) ○ – 4,04 мм і 4) △ – 1,29 мм.



Результати наведені на рис. 1 показують, що коефіцієнт тертя λ при турбулентній течії в трубі розбавленого поліметилметакрилату в моноклоробензолі незвичайно малий. Він відносив це «до впливу стінки» чи області біля стінки, куди полімерні молекули не можуть потрапити із-за свого великого розміру. Томс показав, що тертя зменшується до 50% від його величини у

чистому розчиннику при масовій концентрації полімерних добавок 0,25%. Інколи це явище називають «ефектом Томса». Але існує більш рання робота, яка робить таке визначення трохи неточним.

Під час другої світової війни виникла крайня необхідність вивчення характеристик течії бензину загущеного алюмінієвими милами. З цією метою вимірювалися перепади тиску в невеликих трубопроводах, заповнених бензином або желеподібною речовиною. У турбулентному потоці перепад тиску на одиницю довжини труби при течії загущеного бензину був значно меншим, ніж у випадку чистого розчинника. При публікації цієї роботи автори пов'язували виявлений ефект зі зміною в'язкості зі швидкістю зсуву у загущених рідинах [7], але у більш пізній публікації [8] висловлене припущення про існування «різних форм течії желе і бензину». Зменшення опору тертя під час турбулентного руху в трубі желе в порівнянні із вихідною, з меншою в'язкістю рідини, з якої желе було отримане, ілюструє інтенсивне гідромеханічне явище, яке пов'язане з течією полімерних розчинів.

У 1959 р. опубліковані одночасно роботи [9, 10]. В них показано, що деякі неньютонівські розчини (розчини, в'язкість яких залежить від швидкості руху чи зсуву) мають аномально низький опір тертя в порівнянні з більшістю інших. Саме низьке тертя мають розчини натрієвої солі карбоксиметилцелюлози (КМЦ). За допомогою забарвлення показано, що турбулентність у рухомих розчинах КМЦ значно зменшується.

Приблизно у той же час працівники нафтової промисловості [11, 12] помітили, що при використанні деяких смол для суспендування піску у воді в змішувачах високого тиску, які використовуються в технологічному циклі буріння свердловин, спостерігається значне зменшення тертя. Найбільш ефективні серед цих смол виявилася гуарова смола рослинного походження. Розчини цієї розповсюджені в промисловості речовини дуже стабільні, сильно стійкі до деструкції і знаходяться в числі кращих природних речовин, які зменшують опір тертя. Досвід нафтодобувної промисловості з використанням гуарової смоли [13], і особливо роботи Крауфорда, поклали початок досліджень явища зменшення опору у ВМС.

Один із перших результатів, отриманих під егідою ВМС, є робота [14], у якій була виявлена спроможність поліоксіетилену зменшувати опір тертя. Поліоксіетилен вважається найбільш ефективним з відомих полімерів, які мають ці властивості. Тільки декількох масових часток цієї речовини на мільйон часток розчинника достатньо, щоб значно зменшити коефіцієнт тертя. До появи цієї роботи публікації зі зменшення опору друкувалися в реологічних журналах, журналах хімічної промисловості і технології нафти, але з початку 1963 р. це явище знайшло місце в літературі з гідродинаміки [15, 16].

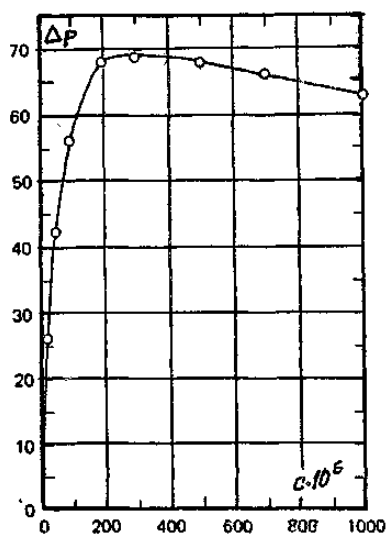
2. Турбулентний рух полімерів, що зменшують тертя

У цьому розділі розглянемо властивості турбулентних течій в трубі розчинів ряду основних полімерних речовин, згрупованих за їх хімічною будовою.

2.1. Гуарова смола

Гуарова смола це складний полісахарид отриманий з рослини *Cyamopsis tetragonolobus*, що широко застосовується як приправа в харчовій промисловості і як загусник рідин. В нафтовій і нафтохімічній промисловості застосування цієї природної смоли в якості добавки для суспендування піску в глинистому розчині привело до відкриття того факту, що розчини гуарової смоли чинять менший опір, ніж вода.

Рис. 2. Залежність зменшення опору тертя Δp від масової концентрації c гуарової смоли в турбулентному реометрі, при числі Рейнольдса $Re = 14000$



Гуарова смола стала речовиною, що широко

використовується як в промисловості, так і експериментальних дослідженнях зі зниження тертя, завдяки відносній дешевизні і міцності молекул, стійкості до деформації у потоці з великими зсувами напруженості.

Крауфорд [17] детально вивчав реологію і турбулентну течію розбавленого розчину. На рис. 2 наведений графік, що показує зменшення опору для розчинів гуарової смоли, отримані на турбулентному реометрі (трубках малого діаметра [18, 19]). Зменшення опору під час руху в трубці розраховувалося за формулою

$$\Delta p = \frac{\Delta p_s - \Delta p_p}{\Delta p_s} 100, \%,$$

де Δp – загальне зменшення опору тертя, Δp_s – втрати тиску на тертя на одиницю довжини трубки (питомі втрати тиску на тертя) при течії чистого розчинника, Δp_p – питомі втрати тиску при течії розчину полімеру.

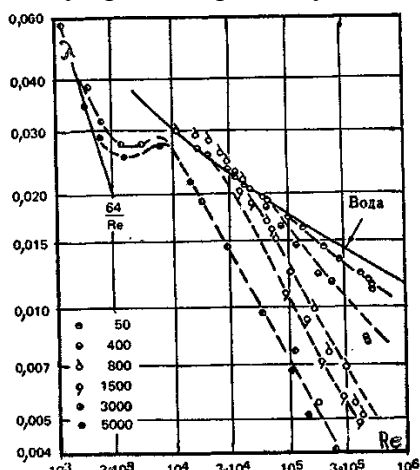
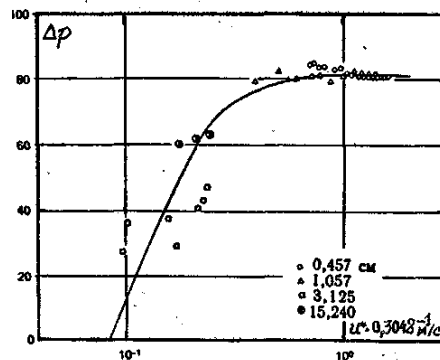


Рис. 3. Вплив концентрації гуарової смоли на зменшення тертя в трубці діаметром 50,8 мм. Число Рейнольдса розраховане за ефективною в'язкістю біля стінки [21]. Концентрація полімеру дається в частках на мільйон.

У роботах [20...23] наводяться результати аналогічних експериментальних досліджень з використанням гуарової смоли. Аналіз результатів цих досліджень дозволив зробити ряд висновків. Як видно з рис. 3, існує залежність зменшення тертя від концентрації розчину гуарової смоли у трубці даного розміру, а також можливий вплив концентрації розчину на число Рейнольдса, яке відповідає початку зменшення опору. Виявлено вплив діаметра труби як на початок зменшення опору, так і на його величину при даному Re. Вплив добавок веде до потовщення в'язкого пограничного шару.

Рис.4. Залежність можливого зменшення тертя Δp від динамічної швидкості u^* . Дослідні дані для розчинів гуарової смоли концентрацією $1,25 \cdot 10^{-3}$ при течії в трубах різних діаметрів [$\Delta p = (\Delta p_v - \Delta p_n) / (\Delta p_v - \Delta p_{\text{лам}})$], де Δp_v і Δp_n – перепади тиску під час руху чистої води і розчинів гуарової смоли відповідно, $\Delta p_{\text{лам}}$ – перепад тиску у випадку, якби рух був ламінарним]. Дані по течії в трубці діаметром 15,24 см наведені для розчинів концентрацією 10^{-3} [25].



У роботі [24] наведені результати впливу гуарової смоли різних концентрацій в трубці діаметром 3,18 см в діапазоні $Re = 10^5 \dots 10^6$. Виявлено, що максимальне зниження тертя в порівнянні з чистою водою спостерігається при концентрації 0,24%. Досліди по течії гуарової смоли в трубах діаметром 15,24 см описані в [24]. Результати роботи, які показують залежність зменшення опору від динамічної швидкості u^* наведені на рис.4.

Доказ того, що структура молекули впливає на явище зменшення тертя наведена в [17], де випробовувався розчин гуарової смоли концентрацією 0,2% і розчин гуарової смоли з бурою. Добавка бури призводить до сильного зростання в'язкості за рахунок утворення поперечно зв'язаних комплексів. Реологічні дослідження вказали на двадцятикратний ріст в'язкості, у разі коли до гуарової смоли було добавлено 0,01% бури. Зменшення опору стало значно меншим.

Застосування гуарової смоли у нафтовій промисловості досягло такого рівня, що автори [26] зуміли скласти план і опрацювати метод зменшення вартості буріння нафтових свердловин з використанням явища зменшення тертя в технологічних процесах.

2.2. Поліоксіетилен

Ряд дослідів показав, що високомолекулярний водорозчинний полімер, що зменшує турбулентне тертя. Зменшення тертя до 40% отримано при течії в трубі розчину концентрацією $0,5 \cdot 10^{-6}$. В'язкість і густина такого розчину практично не відрізняється від аналогічних характеристик води. При більш високих концентраціях, наприклад $25 \cdot 10^{-6}$ зменшення опору в трубі з внутрішнім діаметром 1,2 см при $Re = 10^5$ складає 75%.

Рис. 5. Залежність зменшення опору тертя Δp від масової концентрації c поліоксіетилену при турбулентному русі в трубі діаметром 0,109 см

Вплив поліоксіетилену на зменшення опору під час турбулентної течії в реометрі наведено на рис. 5. Розчин цієї речовини в указаному діапазоні концентрацій значно зменшує опір тертя.

Виявлено [28], що сильно розбавлені розчини з концентрацією $0,5 \cdot 10^{-6}$ помітно зменшують тертя (рис. 6) і можуть чинити вплив на число Рейнольдса, яке характеризує перехід від ламінарного режиму руху до турбулентного. Більш високі концентрації $6 \cdot 10^{-6}$ збільшують число переходу майже до 10000. Вплив на перехід стають більш помітними при великих напругах зсуву. Аналогічні результати описані в [29].

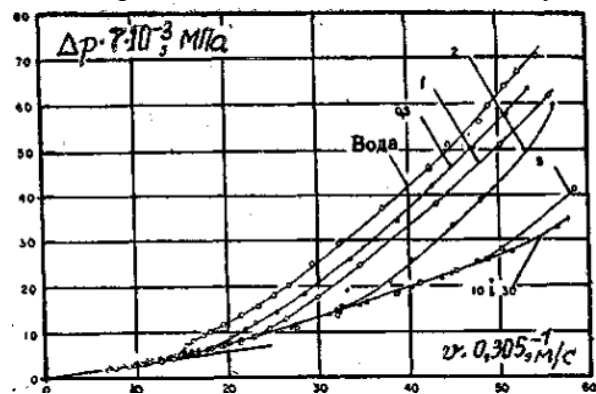


Рис. 6. Експериментальні дані руху розчинів поліоксіетилену в трубі діаметром 0,0584 см [28], концентрація наводиться в частках на мільйон.

Одним з перших вивчав розчини поліоксіетилену Вірк [30], яким виявлено вплив на втрати тиску при течії в трубі розчинів малої концентрації – порядку $5 \cdot 10^{-6}$.

Результати при течії розчинів поліоксіетилену різних концентрацій в трубі діаметром 5,08 см наведені на рис.7, показують, що розчин з концентрацією $3 \cdot 10^{-6}$ ефективно зменшує тертя в трубі довжиною 30 м. Розчини більш високих концентрацій (до $25 \cdot 10^{-6}$) зменшують тертя понад 70%. Інші результати при течії в трубах діаметром 5,08 см отримані в роботі [31], де максимальний ефект отримано при концентрації 10^{-5} .

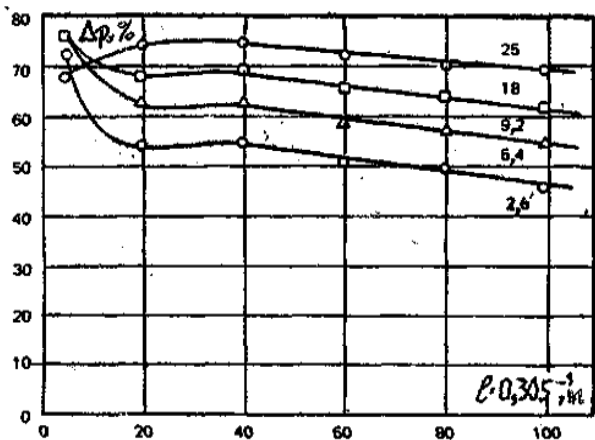


Рис. 7. Експериментальні дані руху розчинів поліоксіетилену в трубі діаметром 5,08 см, концентрація наводиться в частках на мільйон.

У деяких роботах вивчалися неводні розчини поліоксіетилену. Досліди з переливання крові (декстрин, фізіологічний розчин і плазма) показують, що турбулентне тертя сильно зменшується. При використанні морської води як розчинника отримані результати аналогічні результатам на чистій воді. Поліоксіетилен в органічних розчинниках, таких як бензол,

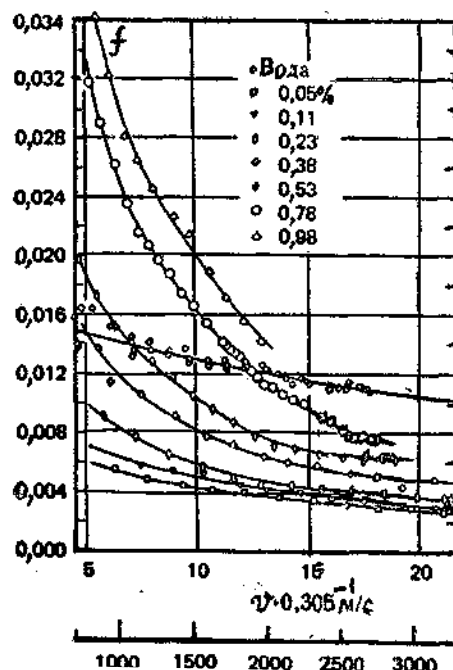
діоксин, чотири хлористий вуглець, нітрометан, хлороформ, двохлористий метилен і анізол, дають результати по зниженню опору, подібні з водними розчинами. У роботі [33] показано, що явище зменшення тертя у певному ступені зменшується, коли у водний розчин вводити K_2SO_4 , молярна концентрація якого не перевищує 0,6, що свідчить про вплив зменшення протяжності полімерних макромолекул у порівнянні з їх величиною в чистому розчиннику.

У роботі [34] вказується, що розчини поліоксіетилену більш високих концентрацій (10^{-4}) не зменшують опір, якщо молярна концентрація K_2SO_4 дорівнює 0,3, хоч внутрішня в'язкість таких розчинів (яку можна розглядати як міру ефективної молекулярної маси) зменшується більш, ніж у два рази у присутності 0,3М K_2SO_4 . Але варто зауважити, що концентрації розчинів поліоксіетилену у цій роботі були значно вищими за тиз, при яких проявляється ефект зменшення опору.

При концентрації K_2SO_4 рівному 0,8М поліоксіетилен випадає з розчину в осад. Подібні явища спостерігалися і з чистим водним розчином при зміні температури. Так, при 60 °С розчин поліоксіетилену помітно губить свою ефективність.

У більшості наукових праць вивчалися сильно розбавлені розчини поліоксіетилену, але доцільно відмітити що виконані дослідження Суенсом показали ефект зменшення опору в розчинах поліоксіетилену концентрацією порядку 10^{-2} . На рис. 8 наводяться результати експерименту в трубі діаметром 20,3 см. Зменшення опору тертя явно проявляється при концентрації розчину, рівній $7,8 \cdot 10^{-3}$ (0,78%).

Рис. 8. Рух концентрованого розчину полідіоксіетилену в круглій трубі діаметром 20,3 см.



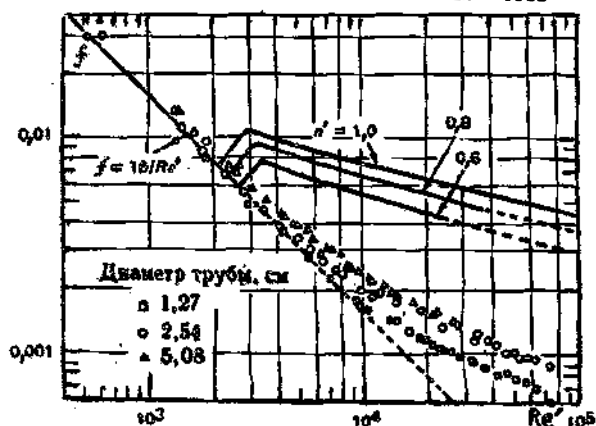
Загальна картина зводиться до того, що абсолютно лінійна молекула поліоксіетилену є ефективним агентом, що зменшує турбулентне тертя у будь-якому розчині.

Такі властивості поліоксіетилену забезпечують його широке застосування у різних експериментальних дослідженнях і впровадженні в промислову практику (різні технологічні процеси).

2.3. Поліакриламід

Розбавлені розчини поліакриламіді помітно зменшують опір тертя в порівнянні з чистою водою. В роботі [35] показано, що поведінка полімеру J-100 значно відхиляється від залежності, запропонованій для в'язких реологічних рідин [36, 37]. У цій роботі отримано велику кількість експериментальних даних по течії в трубі в'язких реологічних рідин, які підпорядковуються степеневому закону в залежності від узагальненого числа Re' .

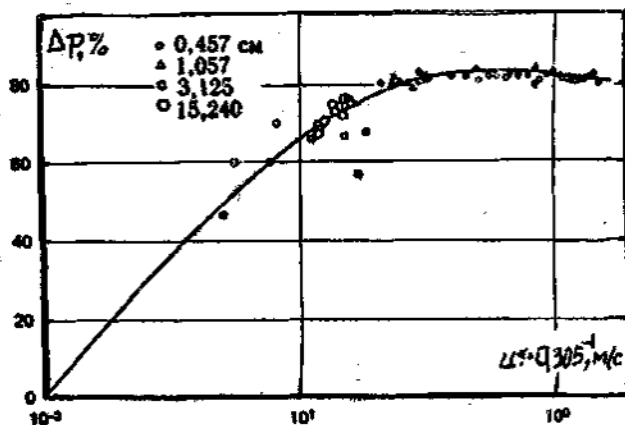
Рис. 9. Залежність коефіцієнта тертя f від узагальненого числа Рейнольдса для чистих реологічних рідин (суцільні лінії) і для водних розчинів поліакриламіді концентрацією 0,3% (експериментальні точки) [35]; n' – степінь реологічності.



На рис. 9 наводяться спостереження за зменшенням опору в розчинах, для яких n' приблизно дорівнює 0,55. Автори пояснюють розбіжність експериментальних даних від теоретичної залежності для чистого реологічного середовища ефектом в'язкопружності.

Данні для іншого поліакриламід у АР-30 в діапазоні діаметрів труб від 0,457 до 15,24 см наведені на рис. 10 [25], з якого видно, що можна отримати зменшення опору на 80% і більше.

Рис. 10. Експериментальні дані для розчинів поліакриламід у АР-30 концентрацією $2,5 \cdot 10^{-4}$ [25]. Визначення можливого зменшення тертя див. у підпису до рис. 4.

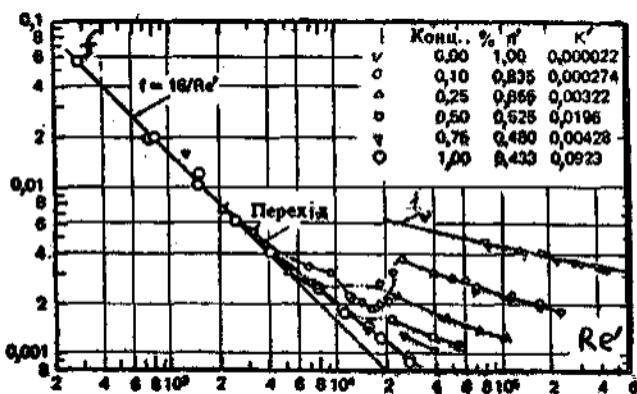


У більшості випадків отримані аналогічні результати при використанні поліакриламід не залежно від фірми, яка випускає цей продукт [39, 40].

Що стосується ефективності (концентрації, яка необхідна для отримання необхідного зменшення опору тертя), поліакриламід знаходиться між гуаровою смолою і поліоксіетиленом. Оскільки поліакриламід розчиняється скоріше, ніж поліоксіетилен, то він в основному використовується в тих експериментах, де необхідна швидка розчинність і велике зменшення тертя.

2.4. Натрієва сіль карбоксиметилцелюлози (КМЦ)

Як говорилося раніше, першою водорозчинною речовиною, що зменшує опір тертя, була вивчена і описана в літературі КМЦ. У роботах [9, 10] вказувалося, що у розчинів КМЦ аномально низька величина коефіцієнта опору тертя. Хоч добавки цієї речовини в масовому відношенні менш ефективні, ніж добавки гуарової смоли, деякі дослідники використовують КМЦ.



Робота [41] була одна з перших, присвячена вивченню впливу цієї речовини.

Рис. 11. Експериментальні дані про рух розчинів КМЦ типу СМС-7НСП в трубі діаметром 2,29 см [41]. 1 – рівняння Кармана-Прандтля для гладких труб $f^{0.5} = 4 \ln Re' f^{0.5} - 0.4$.

На рис. 11 наводяться експериментальні дані отримані під час руху в трубі діаметром 2,29 см різних концентрацій розчини КМЦ. Не дивлячись

на те, що необхідні концентрації великі у порівнянні з іншими речовинами, однак за допомогою КМЦ можна отримати значне зменшення турбулентного тертя. У цьому випадку величина степені реологічності η' теж дуже мала, що видно з даного графіка. Пізніше були опубліковані роботи [42, 43], де наводяться додаткові дані по течії розчинів КМЦ в трубі. В роботі [38] вивчалися деякі зразки КМЦ з різною структурою молекул для того, щоб пов'язати молекулярну структуру з ефективністю зменшення тертя. Виявлено, що структура КМЦ, яка описана в [41...43], недалеко від оптимальної.

2.5. Інші полімери і розчинники

Виявлено, що багато інших речовин з відповідними розчинниками мають властивість зменшувати опір. Деякі пари полімер – розчинник дають зменшення під час руху в трубах наведені в табл. 1 з відповідними відправленнями на літературу. Більш повна таблиця наведена в [44].

Речовини, що зменшують опір тертя

Речовина	Розчинник	Література
Льняне борошно	Морська вода	[45]
Гідроксиетиленцелюлоза	Вода	[46]
Бромистий цетилтриметиламоній	Вода	[47]
Нафтол	Вода	[47]
Полізобутилен	Циклогексан	[48]
Поліметилакрилат	Толуол	[48]
Полізобутелен	Сира нафта	[49]
Полізобутелен	Гас	[49]
Патентований засіб	Гідравлічна рідина	[50]
Полістерол-сульфонат натрію	Вода	[51]

Таким чином, наведені дані показують, що існує велика кількість пар полімер – розчинник, які можуть значно у порівнянні з чистим розчинником зменшувати величину коефіцієнта опору під час руху розчину в трубах. Вивчення властивостей змінювати величини тертя у цих полімерів приводить до висновку, що будь які макромолекулярні речовини досить великої молекулярної маси (50000 і більше) і з лінійною будовою молекул будуть зменшувати опір в будь якій рідині, в якій вони розчиняються.

3. ЗАУВАЖЕННЯ ДО ТУРБУЛЕНТНОГО РЕЖИМУ РУХУ РОЗБАВЛЕНИХ ПОЛІМЕРІВ У ТРУБАХ

Дослідження коефіцієнтів турбулентного тертя при течії в трубах, викладене у попередньому розділі, виявили ряд інших явищ, пов'язаних з полімерними розчинами. Кожне з цих явищ є областю детального дослідження і подальшого виявлення принципів динаміки рідини. Кожне з цих явищ ще раз демонструє незвичайні властивості макромолекулярних розчинів.

3.1. Вплив діаметра

Багато експериментальних даних свідчать про вплив діаметра труби на коефіцієнт тертя при певному значенні числа Рейнольдса. У роботі [13] вказується, що це можна пояснити впливом молекул полімеру на пограничний шар безпосередньо біля стінки труби. Якщо молекули впливають на пограничний шар, то цей ефект буде краще спостерігатися в тонких трубках, у яких пограничний шар складає більшу частину повного потоку. Це добре видно з експериментальних даних, наведених на рис. 9.

Теорія викладена в [52] вказує на вплив діаметра труби при постійному числі Рейнольдса, але необхідні реологічні константи для оцінки теорії і порівняння її з експериментальними даними ще не отримані.

При великих значеннях чисел Рейнольдса вплив діаметра стає менш помітним. За допомогою методу осереднення експериментальних даних (наприклад, [25], рис. 4 і 10) намагаються звести до мінімуму вплив діаметра, щоб скласти більш повну уяву про явище зменшення опору тертя.

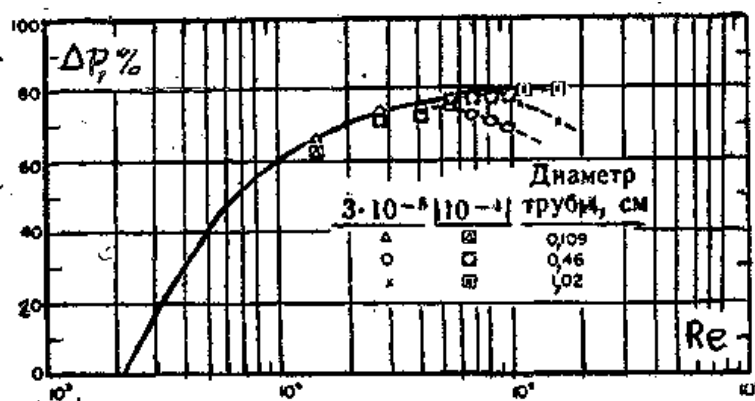


Рис. 12. Максимальні значення зменшення тертя під час руху в трубах розчинів поліоксіетилена

3.2. Ефект максимального зменшення опору тертя

Експериментально було виявлено, що при течії в трубах зменшення опору для любого даного числа Рейнольдса досягає максимуму за відповідного підбору концентрації розчину і розмірів труби для кожного типу полімеру. Іншими словами, кожний полімер, що зменшує опір, може давати максимальне зменшення опору для даної труби і швидкості течії за відповідного підбору концентрації. Існування такого максимуму було наведено в роботі [16] (рис. 12).

Щоб проілюструвати дієвість рис. 12, у табл. 2 наведені концентрації розчинів різних полімерів, за яких досягається максимальне зменшення опору, приблизно на 67%, при $Re = 14000$.

Таблиця 2

Концентрація полімеру $c \cdot 10^6$ для досягнення 67% знижки опору в трубі при $Re = 14000$

Розчин полімеру	$c \cdot 10^6$	Розчин полімеру	$c \cdot 10^6$
Гуарова смола	400	Поліоксietилен	10
Смола карайя	850	Поліакриламід	20

У роботі [38] підтверджене припущення, що максимальне досягнення зменшення опору становить біля 80% (якщо течія буде повністю ламінарна), що стверджують дані наведені на рис. 13.

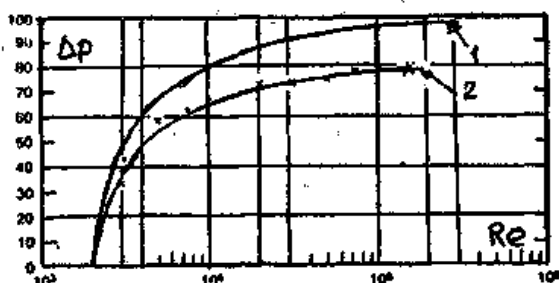


Рис.13. Експериментальні значення максимального зменшення опору у порівнянні зі зменшенням опору на 80%, який був би досягнутим, якби течія стала ламінарною [38]: 1 – максимальне можливе зменшення опору для ламінарного режиму руху; 2 – 80% від максимуму; x – найбільше зменшення опору тертя.

Відмічений результат мабуть не залежить від типу полімеру, розміру труби і числа Рейнольдса і може бути важливим для розуміння механізму зменшення тертя полімером.

У роботі [53] виявлено, що максимальне зменшення опору описується універсальною асимптотою, яка не залежить від параметрів полімеру. Аналітичний вигляд цієї асимптоти [54] показує, що у порівнянні з реологічними законами турбулентного тертя в гладких трубах

$$f^{-0,5} = 4,0 \lg(Re f^{0,5}) - 0,4,$$

а асимптота для максимального зменшення опору тертя має вид;

$$f^{-0,5} = 19,0 \lg(Re f^{0,5}) - 32,4.$$

Показано [55], що це співвідношення справедливе також для шорстких труб з невеликими значеннями турбулентних чисел Рейнольдса.

3.3. Початок зменшення опору

Як видно з рис. 14 [56], повинні існувати порогові значення напруження зсуву, вище яких розпочинається зменшення опору. Для однієї і тієї ж рідини при збільшенні діаметра труби однаковим напруженням зсуву відповідають більші значення числа Рейнольдса. Отже, ефект, наведений на рис. 14, означає, що початок зменшення опору відповідає деякому значенню порогу напружень зсуву.

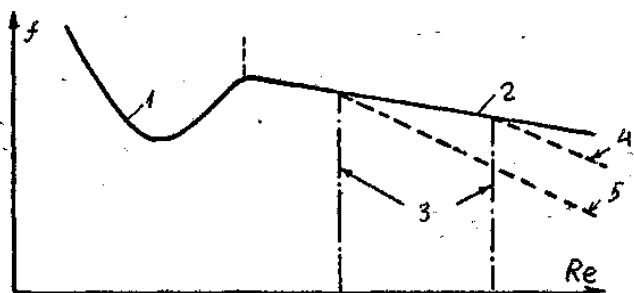


Рис.14. Схема ефекту порогу при зменшенні опору в трубах різних діаметрів при постійному напруженні зсуву [56]: 1 – ламінарна область; 2 – турбулентна область; 3 – значення порогу чисел Рейнольдса; 4 – великий діаметр труби; 5 – малий діаметр труби.

Масштаби турбулентності в пограничному шарі характеризуються напруженням зсуву біля стінки, іншими словами

існування межі погоджується з вимогою, що масштаби турбулентності повинні бути досить малими, щоб на них чинила вплив молекула полімеру. Існування порогу ефекту було виявлене в дослідях з гуаровою смолою в трубах [20], такий же ефект відмічався і в роботі [57]. Автори [58] зробили припущення, що початок зменшення опору в трубі відбудеться при постійному значенні добутку $D_M K^*_D$, де D_M – розмір макромолекули в розчині, при цьому $D_M = 2R_G^2$ – подвоєне середньоквадратичне відхилення радіуса обертання, Å; $K^*_D \approx (\tau^*_w)^{0.5}$ – характеристика хвильового числа турбулентного потоку; * – позначення умов початку процесу. Звідки виходить, що $R_G^2 \tau^*_w = \text{const} \approx 45 \cdot 10^{-15}$ Н.

Вірк, використовуючи результати чотирьох зразків поліоксіетилену малої молекулярної маси, показав, що добуток $R_G^2 \tau^*_w$ був дійсно постійним. Для поліоксіетилену з малою масою $\sim 4 \cdot 10^6$ величина $R_G = 1955$ Å і з його гіпотези виходить, що τ^*_w повинно становити $11,8 \cdot 10^{-5}$ Н/см². У роботі [31] показано, що для поліоксіетилену число Рейнольдса для початку зменшення опору в трубі діаметром 5,08 см становило 11150, що відповідає $\tau^*_w = 1,8 \cdot 10^{-5}$ Н/см².

Фебула та ін. [59] критикують гіпотезу Вірка на тій підставі, що 1) із припущення залежності зменшення опору від $2R_G$ виходить, що макромолекули діють на масштаб турбулентності значно менше, ніж це слідує з теорії турбулентності; 2) вона ґрунтується на інтуїції. І вони, використовуючи теорію полімерів, отримали, що $(R_G^2)^{3/8} \tau^*_w = 17 \cdot 10^{-15}$. Початкова напруга для полімерів, розрахована за даними роботи [31], становить $2,1 \cdot 10^{-5}$ Н/см², що є більш надійною оцінкою, ніж за гіпотезою Вірка.

У роботі [60] виконано вивчення доступних даних за допомогою опрацювання необхідних параметрів на ЕВМ. Виконаний аналіз показує, що гіпотеза Вірка краще відповідає опрацьованим даним, ніж співвідношення Фебула, але дають значне розкидання результатів. З логічної точки зору представляється більш правдоподібним взаємозв'язок початку явища зменшення опору з часовим масштабом (за Фебулом), оскільки часові масштаби полімерного розчину і вихрового гідродинамічного руху спів розмірні. Необхідні додаткові експериментальні дані, щоб визначити дійсні параметри «початку». У [61] був виміряний час релаксації розчину поліоксіетилену, який мав порядок 10^{-3} с, тобто того самого порядку, що і часовий масштаб турбулентного потоку.

В [55] показано, що початок зменшення опору тертя в шорстких трубах з'являється при тих же напруженнях зсуву на стінці, що і для гладких труб.

Розбіжності між співвідношеннями, які описують початок зменшення опору, можна позбавитися якщо прийняти, що полімери діють як агрегати молекул того ж фізичного розміру, що і в малих турбулентних вихорів, але з часом релаксації, як в окремих молекулах.

У різних речовин початок зменшення турбулентного опору відбувається при різних порогах напружень зсуву: у поліоксіетилену порогова напруга зсуву менша, ніж у поліакриламід, а в останнього у свою чергу менша, ніж у гуарової смоли.

Є дані про вплив концентрації полімеру на порогові зсуви, особливо для малоактивних речовин, таких як гуарова смола. У роботі [21] виявлено певний ефект концентрації під час руху гуарової смоли. У роботі [25] відмічається, що порогові напруги зсуву в розчинах поліакриламід залежать від концентрації, У [31] показано, що у поліоксіетилену такого ефекту не спостерігається, аналогічний результат отримано в [55].

При вивченні частот, що відповідають дрібномасштабним вихорам в [22, 62] виявлено, що «початок» зменшення опору тертя в трубах повинно бути пропорціональним величині $D^{8/7}$. Експериментальні дані [25, 60] цей результат не підтверджують.

3.4. Запізнення переходу

Якщо напруження зсуву, яке необхідне для початку зменшення опору, реалізується в ламінарному режимі течії полімерного розчину в трубі, графік залежності коефіцієнта опору від числа Рейнольдса представляє собою плавну криву, що продовжує лінію повністю ламінарного руху, що показано на рис. 9 для тонкої трубки. Ефект, що спостерігали, можна розглядати як явище переходу від ламінарного режиму течії до турбулентного, де перехід визначається точкою відхилення графіка від лінії повної ламінарної течії.

У роботі [63] вивчалася явище запізнєння переходу в маленьких трубках для суміші поліоксіетиленів різної молекулярної маси і поліакриламід. Виявлено значне запізнєння переходу, при цьому на перехід сильно впливала наявність в розчині полімерів з найбільшою молекулярною масою.

У роботі [64] наводяться дані точних вимірів тиску, зроблених в трубці під час руху води в діапазоні чисел Рейнольдса 3780, що відповідають перехідному режиму течії, і в потоках з такими ж швидкостями при течії розчинів поліоксіетилену.

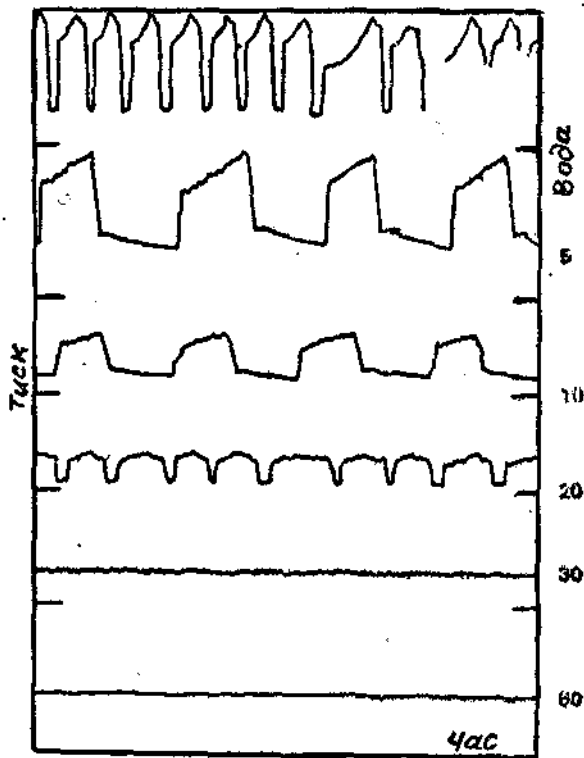


Рис. 15. Пульсації тиску в трубці при $Re = 3780$ у різних концентраціях поліоксіетилену [64] (концентрація в частинах на мільйон).

На рис. 15 показано, як у швидких пульсаціях з великою амплітудою у потоці води при перехідному режимі із збільшенням концентрації полімеру спочатку падає амплітуда, а при концентрації $3 \cdot 10^{-5}$ течія взагалі стає ламінарною.

Автори [29] використали метод забарвлених струмин, щоб показати запізнєння переходу при течії полімерних розчинів в трубці. На приведеному рис. 16 видні джерела турбулентності у воді при числах Рейнольдса 2280. Аналогічні джерела в розчині поліоксіетилену з концентрацією $5 \cdot 10^{-7}$ спостерігалися тільки при числах Рейнольдса 4440. У роботі [65], використовуючи цей же метод, виявлено невелику різницю в характеристиках ламінарної течії полімерних розчинів і води: у разі коли число Рейнольдса під час руху розчину досягало 2000, у потоці спостерігався радіальний рух.

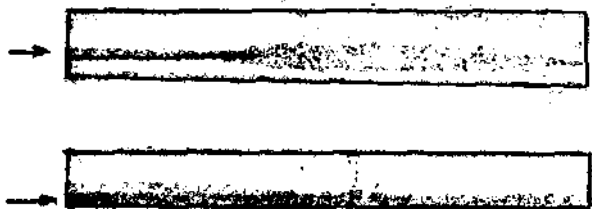


Рис.16. Перехід у скляній трубці діаметром 0,147 см. Зверху – вода при $Re = 2280$, внизу – розчин поліоксіетилену $5 \cdot 10^{-7}$ при $Re = 4440$. Стрілкою показаний напрямок руху потоку [29].

У трубах великого діаметра, де порогові зсуви напруження реалізуються тільки у турбулентному потоці, вплив полімерних добавок на запізнєння переходу не виявлено. Автори [48] говорили про дві моделі явища зменшення опору, які залежать від напруження зсуву.

3.5. Перенапруга в розчинах мила

Деякі розчини мила виявляють ефект зменшення опору тертя, у роботах [66...68] були використані, під час проведення експериментів, лужні метали і амонієві мила, такі добавки, що зменшують опір. З їх використанням отримані великі зменшення тертя (понад 80%). Але при великих напруженнях зсуву ці речовини в розчині гублять свої властивості і розчин поводить себе як розчинник. Це наведено на рис. 17 [47, 69]. Розчин готувався з суміші цетилтриметиламонійбромиду (СТАВ) і 1-нафтола загальною концентрацією $5,08 \cdot 10^{-4}$. Зломи кривих в залежності від числа Рейнольдса для різних діаметрів труб відповідають постійній величині зсувного напруження $\tau_w = 4.8 \cdot 10^{-4} \text{ Н/см}^2$. Але виявлено, що ця величина може досягати 10^{-2} Н/см^2 при більш високих концентраціях (до $2 \cdot 10^{-3}$) розчинів мила.

Втрата ефективності при перенапрузі і той факт, що молекулярна маса молекул мила не може перевищувати декількох сотень, наводять на думку, що молекули мила утворюють

міцели чи об'єднуються в лінійні структури. Такі сполуки молекул призводять до зменшення турбулентного тертя до певного напруження зсуву, після чого зв'язки міцели руйнуються і рідина стає ньютонівською.

Рис. 17. Зменшення опору тертя під час руху еквімолярного розчину СТАВ і 1-нафтолу із загальною концентрацією $5,08 \cdot 10^{-4}$ [47].

Іншою стороною цієї ситуації є те, що, у разі зменшення напруження, зв'язки перебудовуються і знову з'являються зменшення тертя. У цьому криється відмінність від полімерних молекул, які при деструкції не поновлюють спроможність зменшувати тертя. Севінс описує дослід, виконаний на розчині мила з концентрацією $2,5 \cdot 10^{-3}$, який зберігав високу спроможність зменшувати тертя (до 73%) при напруженні зсуву на стінці $2 \cdot 10^{-3} \text{ Н/см}^2$ безперервно на протязі 88 годин, при цьому циркуляція рідини створювалася відцентровим насосом.

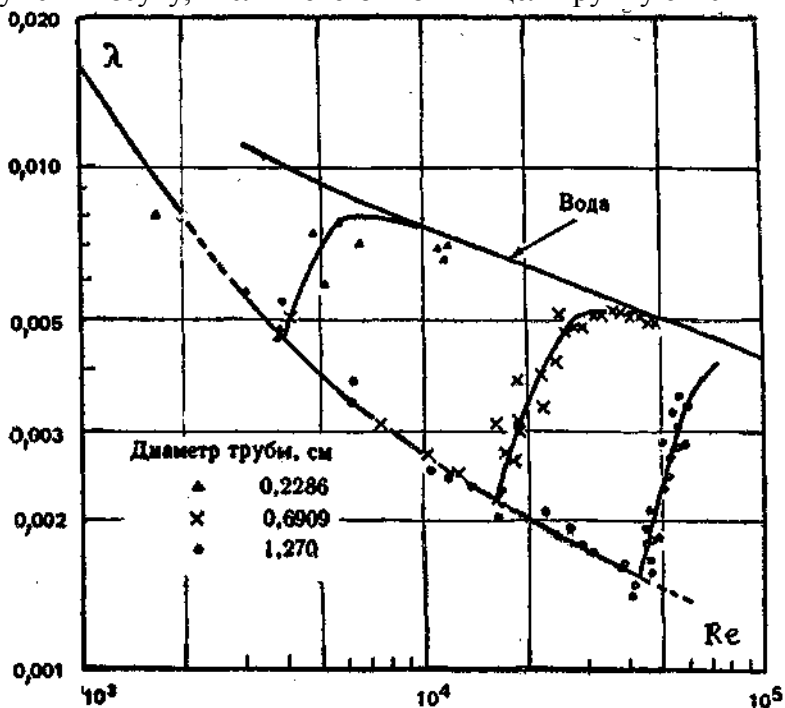
Автори [70] вивчали зменшення опору в неводних мильних розчинах. На відміну від ефекту перенапруги у водних розчинах вони виявили значне зменшення опору аж до самих великих напружень зсуву до $5 \cdot 10^{-2} \text{ Н/см}^2$. Їх дані для 1%-ного розчину діолеату алюмінію в толуолі показали зменшення тертя до 50% і більше. Автори приписують це відсутності ефекту перенапруження більш потужними молекулярними зв'язками, що існують в цьому неполярному розчиннику, які утримують молекули мила в міцелах при більших напруженнях, ніж у водних розчинах.

У роботі [71] також виявлено аномальну поведінку неводних розчинів мила: розчинів алюміній ді-2-етилгексаноату в толуолі. Ця пара розчинене – розчинник дає добрі зменшення тертя при низьких концентраціях $5 \cdot 10^{-5}$, але при повторних дослідженнях ефективність трохи зменшилася. Інші дані стосовно миль, які зменшують опір тертя, наведені в роботі [73].

3.6. Шорсткість

Питання про те, чи являються полімерні розчини ефективними в шорстких трубах, важливе для можливості технічного використання ефекту зменшення опору тертя. У роботі [16] показано, що добавки ефективні на шорстких поверхнях. Пізніше багато дослідників виконували експерименти на промислових трубах звичайної шорсткості. Є ряд наукових праць по течії рідин, що містять у собі полімери для зменшення опору тертя у трубах, на стінки яких нанесена штучна шорсткість.

У роботі [73] виконані експерименти на трубі квадратного перерізу, в якій дві стінки були гладкі, а інші дві були чи гладкими або мали шорстку поверхню. Шорсткість стінок досягалася цементуванням крупинок карбиду кремнію зі стінкою. Крупинки були розміром 0,6 – 0,7 мм, параметр гладкості був $R/k = 58$, де R – радіус труби, k – розмір крупинки (дійсна шорсткість). Виявлено, що розчин поліоксіетилену концентрацією $1,5 \cdot 10^{-5}$ зменшував тертя у шорсткій трубі, а при концентрації $6 \cdot 10^{-5}$ тертя було навіть меншим, ніж при течії води в гладкій трубі. У роботі [74] виявлено, що як поліоксіетилен, так і міцели мила ефективні в шорсткій трубі діаметром 0,27 см, в якій шорсткість утворювалася



нарізкою з кроком 0,14 см. Не знайшло пояснення, чому розчин гуарової смоли не дав при дослідженні ефекту зменшення тертя в діапазоні чисел Рейнольдса до 50000.

У роботі [76] виявлено, що при великих значеннях шорсткості поліакриламід менш ефективно зменшує тертя за великих чисел Рейнольдса. Показано, що втрати ефективності викликається не деструкцією полімеру, оскільки тертя зменшується в гладких частинах труби як вгору так і вниз за потоком від шорсткої області.

У роботі [77] отримані подібні результати з менш ефективним полімером КМЦ. При великих числах Рейнольдса потік стає «повністю шорстким» і зменшення тиску визначається майже повністю профілем опору. Ефект добавки зменшувався, поки не зникав повністю. У [78] отримані такі самі результати із поліоксіетиленом.

У роботі [79] виявлено, що поліоксіетилен більш ефективний у трубах з шорсткими стінками, ніж поліакриламід. Прямокутні труби з різними значеннями шорсткості випробовували на воді, 0,01%-ному розчині поліоксіетилену і 0,01%-ному розчині поліакриламід. У гладкій трубі результати зменшення тертя з поліоксіетиленом і поліакриламідом були майже однаковими, але у шорстких трубах поліоксіетилен мав більшу ефективність, ніж поліакриламід.

Грунтовні результати зі зменшення опору полімерними добавками у шорстких трубах отримані в роботі [55]. Як параметри труби, так і характеристики полімерних розчинів були точно визначені, що дало можливість отримання найбільш точних результатів.

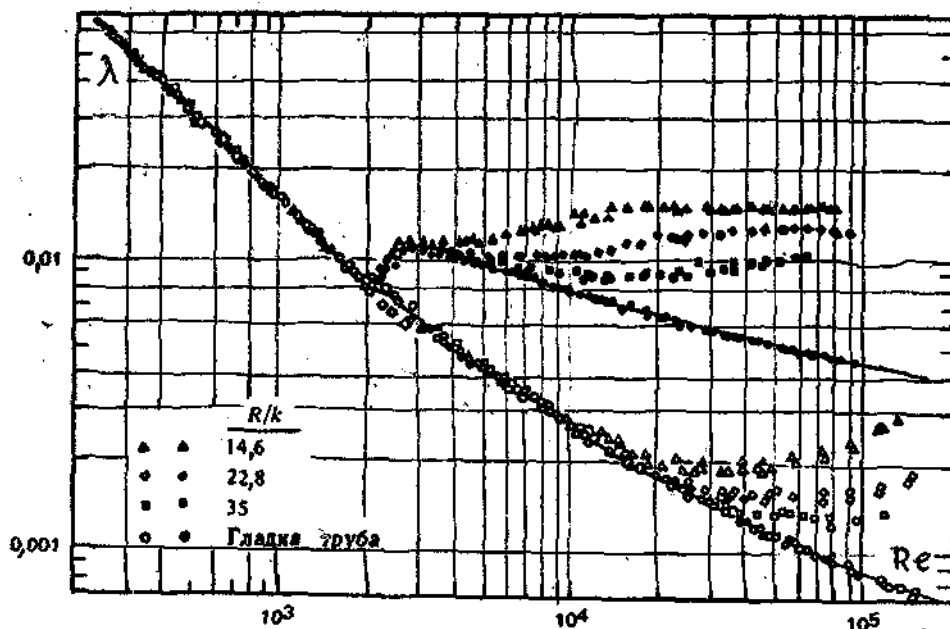


Рис. 18. Вплив шорсткості на величину максимального зменшення опору тертя. Темні точки відповідають руху розчинника, світлі – руху розчинів полімерів [55].

Як видно з рис. 18, коефіцієнт опору тертя навіть у самих шорстких трубах може бути доведений добавками, що зменшують опір, до значень у гладких трубах, поки не буде досягнуто числа Рейнольдса, за якого дані шорстких труб розходяться: чим більша шорсткість труби, тим раніше спостерігається відхилення від даних по гладкій трубі. Ці дані також показують, що початок зменшення тертя відбувається при тій самій напрузі зсуву на стінці у шорстких трубах, що і в гладких, при цьому початкова напруга зсуву на стінці не являється функцією концентрації полімеру в розчині і що число Re , за якого спостерігається максимальне зменшення опору як в гладкій, так і шорсткій трубі, однакова.

Шорсткість промислових труб не чинить особливого впливу на ефект зменшення тертя, тому що полімерні добавки виявляють хорошу ефективність при більшій шорсткості.

У роботі [80] опрацьована теоретична модель, яка ґрунтується на припущенні, що вплив відносної шорсткості на течію з полімерами і без них носить однаковий характер. Ця

модель придатна для якісного опису експериментального матеріалу, хоч і робить спробу передбачення ефекту на неоднорідній шорсткості.

3.7. Профілі швидкості

Не дивлячись на те що розробка апаратури для вимірювання профілів швидкості полімерних розчинів в турбулентному потоці в трубі є спеціальною проблемою, якій буде приділено більшу увагу пізніше, багато дослідників вивчали розподіл швидкостей в трубах. Їх результати багато в чому схожі.

У роботі [81] показано, що ньютонівські і неньютонівські невязкопружні рідини (тобто такі, що не знижують опір) мають істотно однакові профілі швидкостей в турбулентному потоці. Полімерні добавки, що знижують тертя, формують складніші профілі швидкостей. Результати, опубліковані в роботі [82], показують, що ці профілі значно плоскіші, ніж у води. Дані, отримані в трубі з внутрішнім діаметром 2 см при течії води і розчинів поліакриламідру різних концентрацій, показують, що відношення $u_{\max}/u_{\text{ср}}$ для розчинів, що знижують опір, залишаються приблизно такими ж, як і для води, але профіль міняється значно. Профіль швидкості турбулентного потоку в трубі може бути описаний наступною формулою:

$$u^+ = A \ln y^+ + B,$$

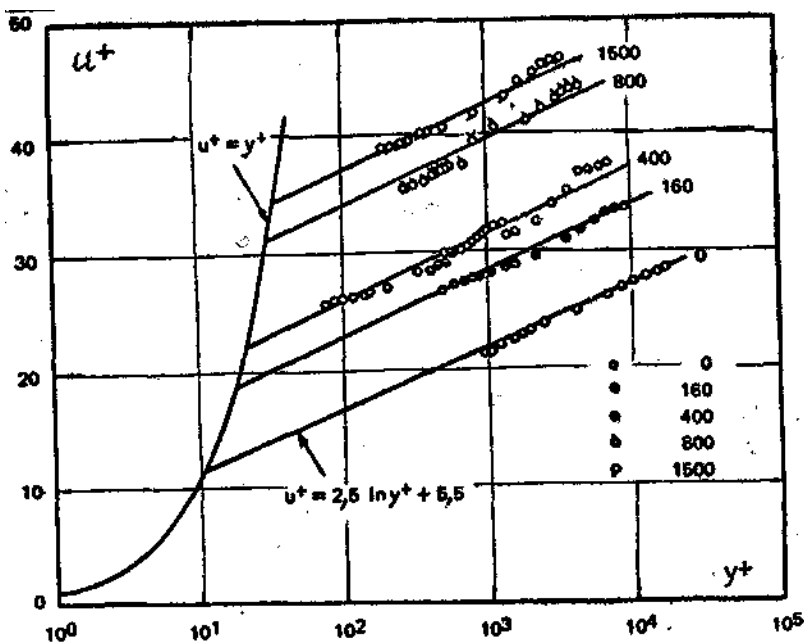
де $A=5,75$, $B=5,5$ для ньютонівських рідин.

Для того, щоб відобразити збільшення відношення місцевих швидкостей u^+ при течії розчину, що знижує опір тертя, може бути введена нова стала ΔB . Тоді

$$u^+ = A \ln y^+ + B + \Delta B.$$

Більшість авторів погоджуються з тим, що стала A не міняється в потоках розчинів, що знижують опір. Отже, константа довжини змішування Прандтля k , а значить, і вихрова в'язкість залишаються незмінними. Ці важливі результати були отримані Метцнером [57] і підтверджені в роботі [21].

Рис.19. Профілі швидкості під час руху розчинів гуарової смоли в трубах діаметром 5,08 см [21] (концентрація полімеру в частинах на мільйон).



На рис. 19 (взятій з роботи [21] показаний вплив ΔB на залежність u^+ від y^+ . Дія добавок, що зменшують тертя, таким чином, виражається в потовщенні ламінарного підшарку. Експериментальна перевірка значення ΔB і явища потовщення підшарку міститься в роботах [30, 31, 83...85]. У роботі [86] показано існування потовщеного підшарку з використанням

високошвидкісної кінозйомки і мікроскопа.

У роботі [87] отримані детальні профілі швидкостей з використанням лазерного вимірника швидкості, який також показує наявність потовщеного шару поблизу стінки при течії па трубі розчинів полімерів (рис. 20). Інший метод, підтверджуючий наявність потовщеного підшарку, був запропонований в роботі [55], де використовували труби з різною шорсткістю. Полімерні розчини давали зниження опору, поки шорсткість проступала крізь підшар. Таким чином було показано [55], що у разі найефективніших полімерних розчинів збільшення товщини підшарку в 2,5 рази більшому, ніж у води. Це означає, що дія полімеру проявляється в буферній чи пружній зоні у межах $5 < y^+ < 50$.

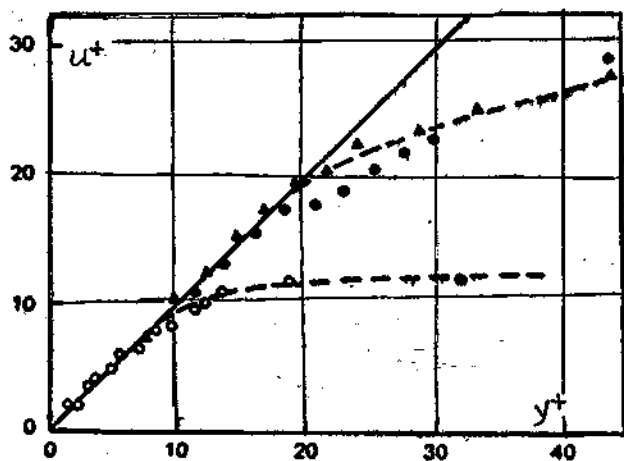


Рис. 20. Експериментальні профілі швидкості уязкому підшарку. Чорі точки – рух поліакриламідного розчину при $Re = 50000$, світлі – рух води при $Re = 14000$ [87].

Величина ΔB є складною функцією характеристик полімеру, концентрації і часу релаксації. Для уточнення цих зв'язків необхідні подальші дослідження. Поняття ΔB , надійно встановилося і представляє собою останній крок в нашому розумінні механізмів зниження тертя за допомогою полімерів.

У роботі [88] був запропонований інший метод аналізу: був введений новий параметр L , що представляє собою товщину шару, в якому вихровий рух гаситься молекулами полімерів. Цей шар може бути товще або тонше ламінарного підшарку товщиною δ . Інша відмінність цього методу полягає в тому, що отримані експериментальні дані представляються через змінну константу Кармані k' замість звичайного значення 0,4 для потоку ньютонівської рідини. Як L , так і k' визначаються по заміряному гідродинамічному опору в трубі. Показана надійна відповідність експериментальних результатів при використанні цього методу, але поки що рано з певністю говорити про переваги цього методу в порівнянні із загальноприйнятим методом з використанням величини ΔB .

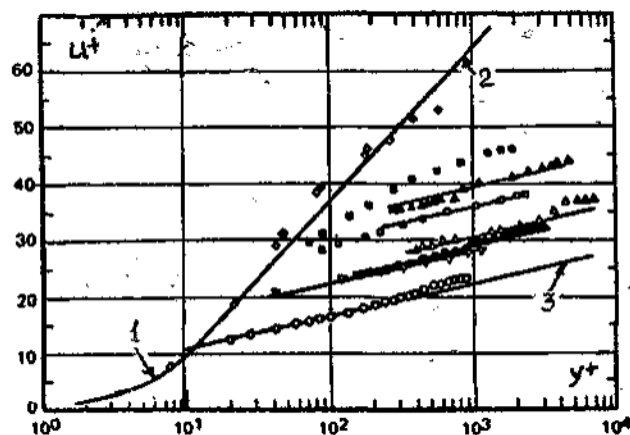


Рис. 21. Уявлення про трьохзонний пограничний шар при русі розчинів полімерів, згідно гіпотези Вірка [89]. Експериментальні точки — це результати ряду досліджень, що свідчать про наявність пружної зони, яка відповідає умовам максимального зниження опору: 1 – в'язкий підшарок; 2 – максимальне зменшення опору; 3 – ньютонівська рідина.

У роботі [89] введено поняття про три зони в пограничному шарі в полімерному потоці, що знижує тертя. Як показано на рис. 21, автор пропонує ввести ньютонівський в'язкий підшар, зону

взаємодії, або «пружний» підшар, який йде по прямій найбільшого або максимально досяжного зниження опору, і зовнішню область з ньютонівською постійною Кармані і ΔB . Ця інтерпретація за допомогою трьох зон дає значно більше розуміння процесів, що протікають в пограничному шарі при зниженні опору.

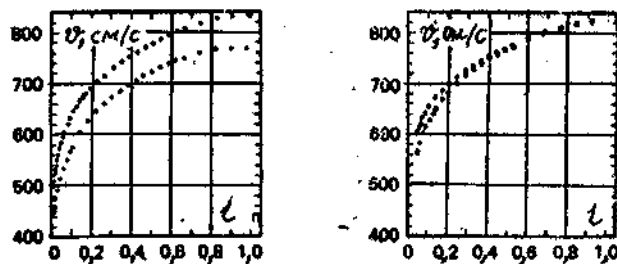
3.8. Апаратура для вимірювання повного тиску і турбулентності.

Астаріта і Никодемо [90] одні з перших показали, що при вимірюванні розподілу швидкостей в трубі за наявності молекул полімерів можливі значні помилки. Метцнер і Астаріта [91] приписують помилки при вимірюваннях в полімерних розчинах за допомогою трубки швидкісного напору або трубки повного тиску викликані: 1) впливом нормальних складових напруги; 2) складному зв'язку між осередненими за часом значеннями напруги з усередненими за часом розподілами швидкостей; 3) великій товщині пограничного шару на датчику в порівнянні з розміром датчика. Останній момент продемонстрований в роботі [92] в досліді з розчином поліоксидетилену (молекулярна маса 750 000, концентрація 10^{-3}). На рис. 22 наведені результати аналогічних досліджень з трубками Пито двох діаметрів.

Мабуть, для зменшення помилок при таруванні бажано мати прилад великого розміру; на жаль, це означає меншу точність при визначенні швидкості за рахунок осереднювання за великою площею. Було доведено [93], що при використанні трубок швидкісного напору

малого розміру (зовнішній діаметр 0,814 мм) спостерігаються істотно занижені покази при вимірюванні швидкісного напору у вязкоупругому, що знижує опір розчині (алюміній — диолеат — толуол) у порівнянні з чистим розчинником.

Рис. 22. Профілі швидкості, отримані за допомогою двох трубок Пито діаметром 0,25 (ліворуч) і 1,68 мм (праворуч), під час руху розчину поліоксіетилену концентрацією 10^{-3} [92]: □ – розчинник; ■ – розчин полімеру; ℓ – відстань від стінки труби в частинах радіуса труби.



У роботі [94] приведені тарировочні криві для трубок швидкісного напору, різних розмірів в розчинах поліоксіетилену різної концентрації. Вони показали, що величина поправки зростає із збільшенням концентрації полімеру в розчині. У роботі [95] вказано, що помилка стає дуже малою при використанні трубки більшого діаметру (9,65 мм) в розчинах з різною концентрацією поліакриламиду.

Взаємодія таких чинників, як тип полімера і концентрація, розміри датчика і швидкість рідини, робить вимірювання швидкості потоку полімерного розчину за допомогою трубки Пито у край складним. Наприклад, автори роботи [96] не змогли виразити результати тарировки ряду різних трубок Пито у функції від розміру датчика, властивостей рідини або швидкості потоку. При низьких швидкостях близько 2 м/с відмічається надзвичайно велике відхилення від дійсного тиску (майже 40%) для трубок, що мають малий отвір (0,25 мм). Зміна конфігурації датчика зменшила відхилення. Поки не буде зрозуміло, як обтікається трубка Пито в'язкоупругою рідиною, що знижує опір, використання таких приладів слід обмежити лише тими випадками, де можлива точна тарировка і жорстке дотримання умов досліду.

Полімерні добавки впливають на характеристики ламинарного потоку і тепловіддачі на круглих циліндрах. Таким чином, можна чекати, що термоанемометри з чутливим елементом у вигляді дротика дадуть помітні помилки при їх використанні в розчинах, що знижують опір. У роботі [91] показано, що такі термоанемометри володіють постійним коефіцієнтом тепловіддачі при швидкості потоку понад 3 см/с в розчині поліоксіетилену концентрацією $1,2 \cdot 10^{-5}$. Метцнер і Астаріта пояснюють це сильно товстим пограничним шаром. Конічний датчик з плівкою, що нагрівається, також має досить плоску характеристику, при цьому він має більшу чутливість в полімерному розчині. Але клиноподібний датчик з плівкою, що нагрівається, який застосували в роботі [97], показав меншу чутливість в поліоксіетилені при досить низьких швидкостях. При більших швидкостях отримано [98] спрощення кривої чутливості для клину з плівкою, що нагрівається, аналогічно датчикам з дротом, що нагрівається. Були відібрані ряд типів чутливих елементів для використання в полімерних розчинах, при цьому кращим виявився конічний датчик з плівкою, що нагрівалася, який дав стабільну криву чутливості, в розчині поліоксіетилену концентрацією $1,8 \cdot 10^{-5}$, подібну, але розташовану декілька нижче, ніж для води. У роботі [95] також рекомендується конічний датчик з плівкою, що нагрівається, для використання в розчинах поліакриламиду. При використанні термоанемометра з плівкою, що нагрівається, у речовинах які знижують опір, для толуолу були отримані добрі результати [93].

Застосовуючи датчик турбулентності з п'єзоелектричним перетворювачем в досить розбавленому розчині в'язкоупругої рідини (0,05% КМЦ), автори роботи [99] виявили, що інтенсивність турбулентності в полімерному розчині, що знижує опір, і в чистій воді були однакові. Спектри частоти показали, що дія полімеру полягало в зниженні низькочастотної турбулентної енергії в порівнянні з водою і збільшенні вищих частот. Досліди з більш ефективною речовиною (поліакриламід) для зменшення тертя, не показали істотної різниці в спектрах води і полімерного розчину [76].

У роботі [100] інтенсивність турбулентності в трубці вивчали за допомогою методу фотографування дрібних бульбашок повітря, що знаходилися в рідині. Було доказано, що в

умовах зменшення опору відбувається зменшення інтенсивності осьових складових турбулентних пульсацій в порівнянні з пульсаціями в ньютонівській рідині і не відбувається помітних змін в радіальній складовій.

Перші роботи з використанням заснованого на ефекті Доплера лазерного пристрою для вимірювання локальних швидкостей в розчині поліоксіетилену концентрацією $5 \cdot 10^{-5}$ показали, що інтенсивність повздовжніх турбулентних пульсацій не відрізняється від тієї, яка спостерігається в чистій воді при її течії у трубі, принаймні до числа Рейнольдса, рівного 23 000 [101]. Інші роботи із застосуванням того ж лазерного пристрою [87, 102] показують, що осьові пульсації змінюються по перерізу труби досить складним чином, як показано на рис. 23. Біля центру труби інтенсивність осьових пульсацій в полімерних розчинах зменшується в порівнянні з потоками води. Далеко від центру осьові пульсації більші в полімерних розчинах. У підшарі інтенсивність повздовжніх пульсацій значно більша, ніж у воді, як це показано на рис. 24.

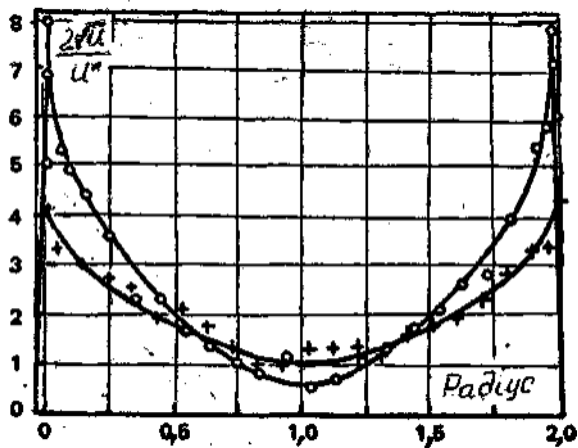


Рис. 23. Розподіл осьової швидкості в трубі [87]: $u^* = 10$ см/с, + – вода, o – розчин поліакриламід з концентрацією 10^{-4} .

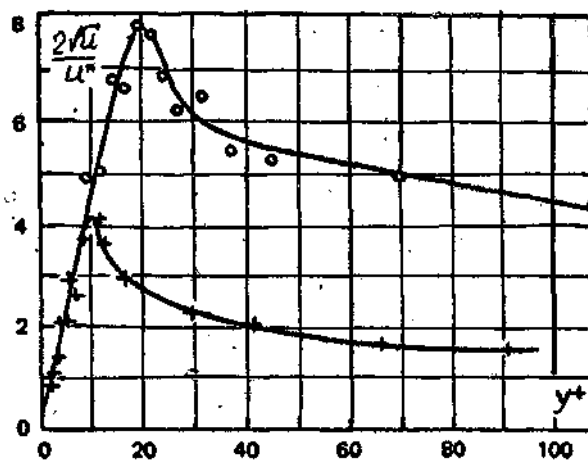


Рис. 24. Пульсації осьової швидкості у в'язкому підшарку [87]: + – вода, o – розчин поліакриламід з концентрацією 10^{-4} при $u^* = 10$ см/с

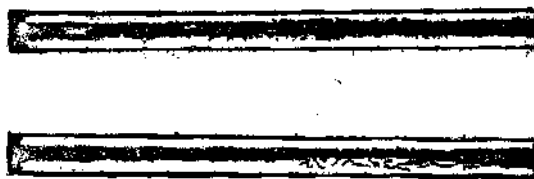
Пояснення дії полімерних рідин на різні типи приладів, призначених для вимірювання потоку, розвиток приладів нового типу і розуміння турбулентного спектру частот відкривають широке поле діяльності для досліджень в подальші роки.

3.9. Візуалізація течії в трубах

У роботі [9], вводили фарбу в центр і біля стінки труби в 0,25%-ний розчин КМЦ і відзначили, що забарвлений струмінь в центрі турбулентного потоку виглядає як би відштовхуваним убік турбулентними вихорами. Автори роботи вважають, що описане явище аналогічно явищу «перемішування». Аналогічної картини не спостерігається при турбулентній течії води, де забарвлений струмінь у мить губив свої контури і повністю розмивався по перерізу труби. Введення фарби біля стінки труби приводило до появи потовщеного забарвленого пристеночного шару в полімерних розчинах — у порівнянні з водою і з меншим числом турбулентних вихорів, що виносять забарвлену рідину в основний потік.

У роботі [103] порівнювалася турбулентна течія в трубі води з розчином поліоксіетилену концентрацією $1,1 \cdot 10^{-5}$ при $Re = 8000$. Із зображення (рис. 25) видно, що додавання макромолекул дуже сильно змінює структуру течії.

Рис. 25. Розмивання фарби у турбулентному потоці при $Re = 8000$: згори – вода, внизу – розчин поліоксіетилену концентрацією $1,1 \cdot 10^{-6}$ [103].



У роботі [100] використовували повітряно-бульбашкову методику візуалізації для вивчення течії в розчинах досить високих

концентрацій поліакриламід у (10^{-3}) і в більш розбавлених. Було виявлено, що в умовах зниження опору перехідний режим течії спостерігається аж до $Re = 31\,000$.

Отримані результати візуалізації потоку з полімерними рідинами є перспективними. Ці дані можуть багато дати для розуміння механізму зниження опору за умови проведення ретельних досліджень. У літературних першоджерелах [220, 221] розглядається стробоскопічна методика візуалізації течії, яка дозволяє виміряти локальні динамічні характеристики турбулентного потоку безпосередньо біля стінки приполовинній ширині каналу рівній 0,5 см.

3.10. Вплив температури

Можна було очікувати, що зміни температури могли б змінити молекулярну структуру розчинних полімерів, Уайт [104] не виявив зміни ефекту зниження тертя в межах від 4 до 37 °C для розчинів поліоксіетилену, поліакриламід і гуарової смоли. Ефективність полімерного розчину при вищих температурах може бути встановлена у залежності від числа Рейнольдса розчинника, і таким чином виявити вплив температури зі зміною числа Рейнольдса потоку. Багато тем, що обговорюються вище, мають багато загального не тільки тому, що пов'язані з вивченням турбулентного потоку високополімерних розчинів в трубі, але також і тому, що всі вони носять незавершений характер і відкривають широке поле діяльності для подальших досліджень. Ці теми досить стисло освітлені і знайомлять читача з потрібною літературою. Природно, очікуються, великі успіхи в дослідженнях в цих напрямках.

4. ТЕЧІЯ БІЛЯ ОБЕРТОВИХ ДИСКІВ, ЦИЛІНДРІВ І ПЛОСКИХ ПОВЕРХОНЬ

При зовнішньому обтіканні полімерними розчинами дисків, що обертаються, циліндрів і плоских пластин з'являється можливість для дослідження гідродинамічних змін положення пограничного шару у присутності полімерних макромолекул в розчині.

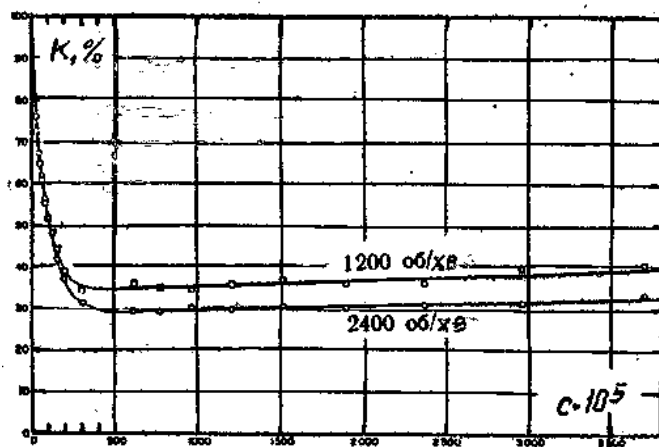
4.1. Обертові диски

Експериментальні дані по турбулентній течії рідин, що знижують опір біля обертових дисків, приведені в роботах [14—16].

Рис. 26. Зміна крутного моменту на обертовому диску діаметром 45,7 см у розчинах гуарової смоли: K – крутний момент.

Основні результати були отримані на великій експериментальній установці (ємність бака з рідиною 3785 л) з диском діаметром 45,7 см, що обертався від електродвигуна постійного струму з такою швидкістю, за якої на більшій частині поверхні диску має місце турбулентний потік. Вимірювалася швидкість обертання диска і крутний момент, що при різних концентраціях полімерних добавок в резервуарі.

На рис. 26 наведені результати для розчинів гуарової смоли. При постійній швидкості обертання додавання полімеру приводить до зниження крутного моменту до тих пір, поки концентрація розчину не перевищуватиме $3 \cdot 10^{-4} \dots 4 \cdot 10^{-4}$ і при цьому крутний момент, буде на 30—40% нижче за своє значення в чистій воді. При подальшому збільшенні концентрації крутний момент, трохи збільшується, що є характерною ознакою збільшення в'язкості розчину. Дані, отримані для чотирьох розчинів поліоксіетилену різної молекулярної маси при швидкості обертання диску 2400 об/хв показали, що із збільшенням молекулярної маси концентрованого розчину, що не перевищує 10^{-4} , можна зменшити величину крутного моменту або, що те ж саме, зменшити турбулентний опір на 70%.



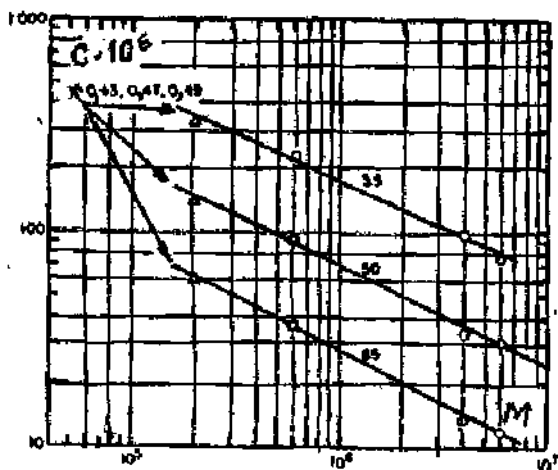


Рис. 27. Вплив зміни молекулярної маси поліоксіетилену на крутний момент (поданий у % до крутного моменту у чистій воді) диску діаметром 45,7 см, що обертається зі швидкістю 2400 об/хв. Суцільні лінії апроксимація степеневою функцією $c \sim M^{-x}$ (M – наближена молекулярна маса полімеру).

Вплив молекулярної маси демонструється на графіку, побудованому в логарифмічних координатах (рис. 27). Крім того, що на рис. 27 представлена залежність зниження тертя від молекулярної маси поліоксіетилену, він також показує, що необхідне значне збільшення молекулярної маси (ступені полімеризації) для речовини добитися більшого зниження тертя, скажемо на порядок.

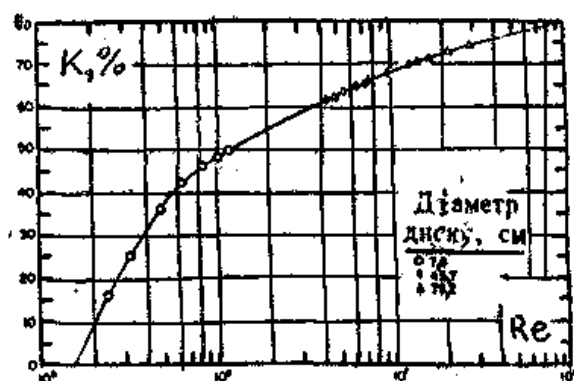


Рис. 28. Максимальне зменшення крутного моменту диску у залежності від числа Рейнольдса (K – зменшення крутного моменту).

Дані по максимальному зниженню опору на дисках різних діаметрів приведені на рис. 28. Результуюча огинає максимальне зменшення крутного моменту як функція від числа Re , що може бути отримана для будь-якого з «ефективних» полімерів, причому концентрація розчину, необхідна для отримання

максимального ефекту, залежить від типу полімеру.

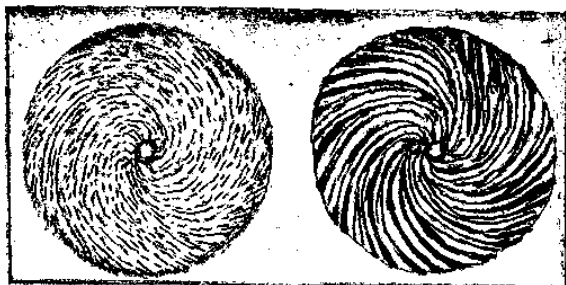


Рис. 29. Сліди фарби при обертанні диску діаметром 25,4 см зі швидкістю 1000 об/хв. Ліворуч – у воді, праворуч – у розчині поліоксіетилену концентрацією 10^{-4} [105].

Деякі типові дані для кривої максимального зменшення крутного моменту представлені на рис. 28 і наведені в табл. 3. Фотографії струменів [105] (рис. 29) показують, що як напрям дотичної до струменів, так і

відстань між ними змінюються, якщо в дослідах з дисками, що обертаються, воду замінити полімерним розчином. Зміни у напрямі дотичних відображають зменшення опору, що сприймається диском в розчині полімеру; зменшення числа струменів і збільшення відстані між ними указують на значні зміни в комірчастій структурі течії. Останній ефект може послужити ключем до остаточного з'ясування механізму зниження тертя полімерними добавками.

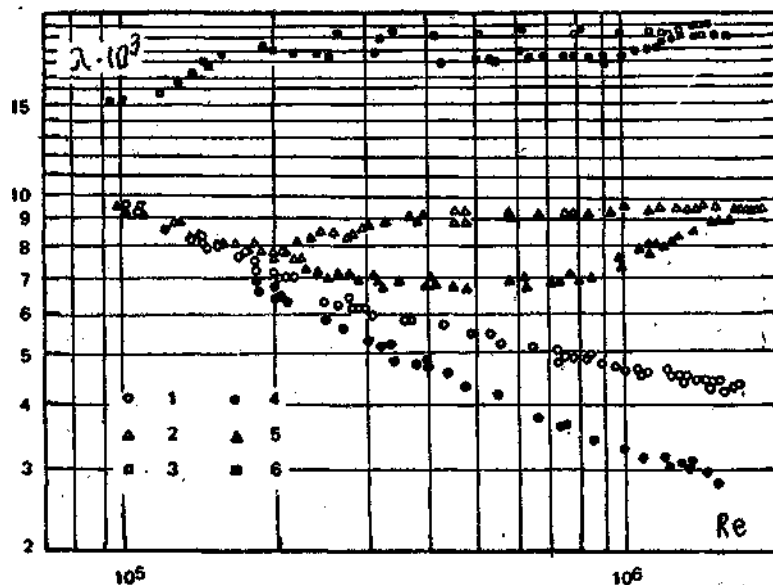
Гед [106] підтвердив ефективність гуарової смоли як речовини, що знижує тертя на диску, що обертається, і, дослідивши пограничний шар показав, що при використанні гуарової смоли потік залишається турбулентним на межі з диском. Ці результати підтверджені іншими дослідниками на обертових дисках [107...109].

Таблиця 3

Масова концентрація необхідна для отримання 70%-ного зменшення крутного моменту на обертовому диску при $Re = 103000$

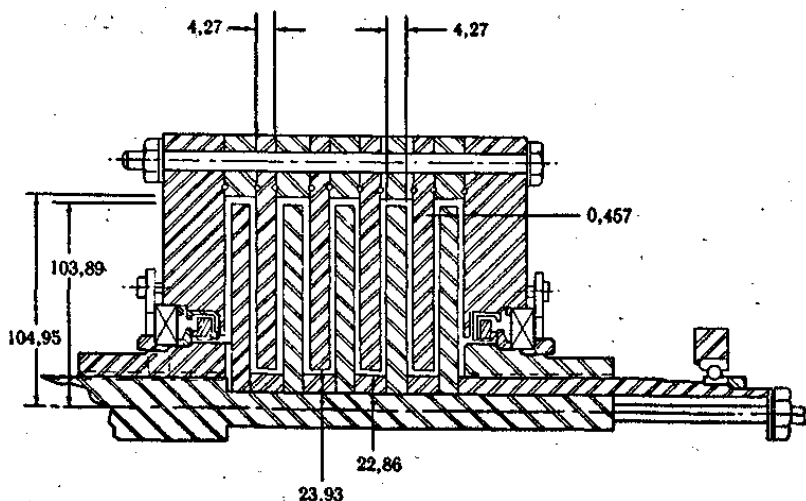
Речовина	$c \cdot 10^6$	Речовина	$c \cdot 10^6$	Речовина	$c \cdot 10^6$
Гуарова смола	500	Смола карфйя	2700	Поліоксіетилен	250
Лакусто-бобова смола	1700	Поліхол-27	850	Саперан AP-30	100

Рис. 30. Коефіцієнти опору тертя обертових дисків діаметром 14 см. Світлі точки – у воді, темні точки – у розчині гуарової смоли концентрацією 10^{-4} . Точкам відповідають наступні дані: 1 і 4 – для гладких дисків; 2 і 5 – для дисків з шорсткістю 0,15 мм; 3 і 6 – для дисків з шорсткістю 0,5 мм [110].



Дослідження з шорсткими обертовими дисками, були проведені в роботах [79, 110]. На рис. 30 показано, що для шорстких дисків, як і при течії в трубах, вплив полімерних добавок на коефіцієнти опору тертя має тенденцію до зменшення при високих Re . Для помірних Re опір тертя може бути зменшеним на дуже шорстких поверхнях дисків.

Рис. 31. Дослідна установка з декількома обертовими дисками [111] (розміри в мм).



Велика серія експериментів проведена на установці, що складається з декількох близько розташованих обертових дисків (рис. 31) [111]. Шорсткі і гладкі диски були випробувані в розчині гуарової смоли при різних температурах. Як показано на рис. 32, гуарова смола давала значні зменшення крутного моменту при заданій швидкості обертання. Коли були введені поправки на втрати в підшипниках, ущільненнях і на валу, виявлено, що зменшення опору складає близько 50% для гладких дисків і більше 60% для шорстких. Збільшення концентрації гуарової смоли до $2,5 \cdot 10^{-4}$ ослаблює ефект, тобто крутний момент ставав дещо більшим. Використання поліакриламиду призводило до негайної втрати ефекту: гуарова смола стабільно забезпечувала зниження опору протягом всього часу випробування (~1 год.). Згодом робота була поширена на рідини на силіконовій основі [112].

У першій теоретичній роботі про обертання диска в рідині, що знижують опір тертя (24), використовувалися дані по максимальному зменшенню опору при течії в трубах, щоб встановити вираз для пограничного шару потоку біля диску. Використовуючи емпіричні формули для профілю швидкості, виведені з даних по перепаду тиску в трубі, автор запропонував формулу

$$K_M = 0,684 / Re^{0,362},$$

де K_M – мінімальний крутний момент на обох сторонах обертового диску. Цей вираз дозволяє з точністю до 8% в порівнянні з експериментальними даними передбачати мінімум величини тертя на дисках в рідині, що зменшують опір тертя; розбіжність може бути обумовлена кінцевими втратами і розташуванням дисків в установці. Мабуть, умови мінімального тертя в потоках в трубах і обертових дисках зв'язані через перетворення, що ґрунтуються на даних тертя в трубах і стандартних аналітичних методах дослідження.

У роботах [109, 113] показано, у разі якщо взяти до уваги зростання товщини в'язкого підшарку в розчинах полімерів (використовуючи дані в трубах), відомий вираз Гольдштейна [114] для обчислення величини опору обертання диску в ньютонівських рідинах може бути перетворено так, що спостерігатиметься хороший збіг аналітичних і експериментальних даних. Таким чином, експериментальні дані на обертових дисках можуть бути задовільно описані аналітично, але з емпіричними константами.

Результати зменшення тертя на дисках, описані вище, дозволяють передбачати багато важливих їх застосувань: використання диска як віскозиметра в турбулентному потоці при визначенні, чи є дана речовина такою, що знижує тертя; використання полімеру як добавки, що зменшує тертя, в двигунах, приводах, коробках передач і тому подібне.

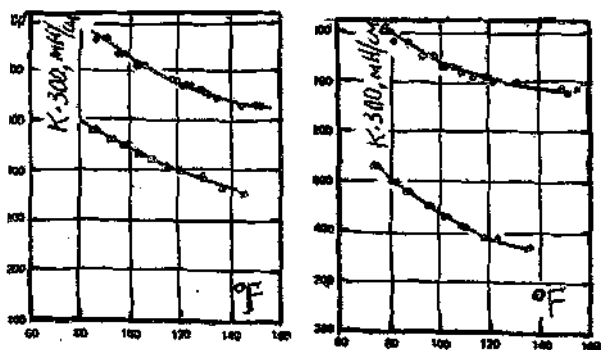


Рис. 32. Крутний момент, який необхідний для обертання п'яти дисків у воді і розчині гуарової смоли зі швидкістю 4720 об/хв. [111]: ліворуч – гладкі поверхні; праворуч – шорсткі поверхні; о – вода; Δ – розчин гуарової смоли $c = 2,5 \cdot 10^{-4}$ [°C = (°F–32)/1,8].

4.2. Обертові циліндри

Вплив полімерних молекул на тейлорівську нестійкість, виявлену при обтіканні обертових циліндрів, розглядався в роботах [115...119]. Розчини полімерів

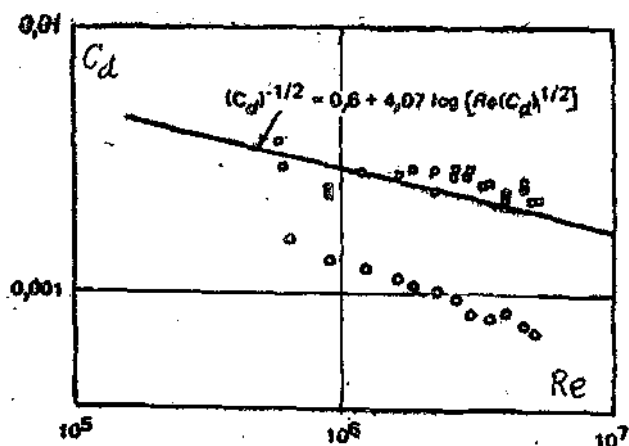
можуть бути такими що стабілізують течію, так і навпаки залежно від геометрії потоку, структури і концентрації полімеру. Крутний момент в розчинах знижується при великих числах Тейлора (перед початком турбулентності) в порівнянні з ньютонівськими рідинами. Це частково пов'язано із зниженням інтенсивності вторинних течій.

Були проведені попередні вимірювання, при турбулентному обтіканні обертових циліндрів [20], де зниження тертя на 30% було отримане в розчині поліакриламіді концентрацією $3 \cdot 10^{-5}$. Повні вимірювання турбулентної течії розчинів полімерів були виконані в роботі [120], де отримано зниження тертя на 20% і більш в розчинах поліоксиетилену.

У роботі [121] виміряний опір тертя на циліндрах, що обертаються у воді і розчині поліоксиетилену концентрацією $3 \cdot 10^{-5}$ (рис. 33). Було виявлено, що малі добавки полімеру зменшують тертя, пульсації тиску на поверхні і височастотний шум, що випромінюється обертовим циліндром.

Рис. 33. Коефіцієнт опору тертя обертового циліндра [121]: □ – водопровідна вода; о – розчин поліоксиетилену концентрацією $5 \cdot 10^{-5}$.

У роботі [122] вивчалася течія рідини в зазорі між коаксіальними шорсткими циліндрами при обертовому зовнішньому і нерухомому внутрішньому. Слід відмітити, що на робочих поверхнях циліндрів були прорізані повздовжні і поперечні канавки, так що шорсткість являла собою щільно прилеглі один до одного чотиригранні піраміди з кутом біля вершини 60° і висотою 1,25 мм при зазорі між циліндрами 10 мм. У розбавленому розчині гуарової смоли зниження тертя відмічено не було, а розчин поліоксиетилену показав значне зменшення опору тертя, проте він швидко втрачав свої властивості.



Необхідно ще вирішити багато цікавих проблем обтікання розчинами полімерів обертових циліндрів. Треба більш повно описати вплив макромолекул на вихори Тейлора, вивчити перехід до турбулентного потоку тощо.

4.3. Обтікання плоских пластин

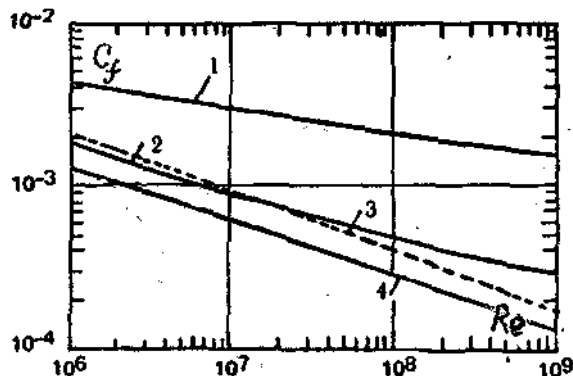
В основі аналітичного вивчення течії розчинів полімерів на плоских пластинах лежить схожість співвідношень для течії в трубах (де є більша кількість експериментальних даних) і біля плоских пластин. Гренвіль [123, 124] застосував ці співвідношення для складання розрахункових схем. Інші дослідники [125...127] отримали подібні співвідношення.

У роботі [24] використані значення максимального зниження тертя, отриманого при течії в трубах розчинів полімерів, щоб передбачити величину максимального поверхневого тертя на плоскій пластині. Результат, отриманий на основі законів подібності й профілів швидкості [24]:

$$C_f = 0,315 \text{Re}_x^{-0,362}.$$

Гренвіль [128] розрахував максимально можливе зменшення тертя на плоскій пластині по асимптоті максимуму зниження тертя при течії в трубі, запропонованою Вірком. Його результати порівнюються з розрахунками [24] і наведені на рис. 34. Обидва методи показують зменшення тертя до 80% і більш при Re порядку 10^9 .

Рис. 34. Зменшення опору тертя на плоских пластинах [128]: 1 – турбулентний режим – без зменшення опору; 2 – максимальне зменшення опору [123, 124]; 3 – максимальне зменшення опору [24]; 4 – ламінарний рух.



У роботі [129] були узагальнені результати [80] по течії полімерних розчинів в шорстких трубах на випадок плоскої пластини. Показано, що ефект зниження опору тертя зменшується при збільшенні шорсткості поверхні. Невелика шорсткість, яка збільшує опір в ньютонівських рідинах, лише трохи впливає на рідини, що зменшують тертя, завдяки зростанню товщини в'язкого підшарку.

У деяких роботах приведені експериментальні вимірювання коефіцієнтів тертя в розчинах полімерів при обтіканні плоскої пластини турбулентним потоком. Емерсон [130] протягував пластину завдовжки 213 см і шириною 61 см в лотку з розчином поліоксиетилену, концентрація якого змінювалася від $1,25 \cdot 10^{-6}$ до $5 \cdot 10^{-5}$. Хоч Емерсон стверджував, що ці дані не дуже надійні із-за поганого вирівнювання спрямовуючих роликів, було отримано 50%-не зниження тертя в розчині полімеру концентрацією $5 \cdot 10^{-5}$ і $\text{Re} = 1,5 \cdot 10^6$. При найменшій концентрації $1,25 \cdot 10^{-6}$ коефіцієнт тертя знижувався до 13% при тих же значеннях Re . Опір тертя моделей суден і понтонів, досліди з якими проводилися в той же час, що і з пластиною, знижувалися аналогічним чином. Це показує, що за допомогою дуже розбавлених розчинів полімерів можна отримати істотні зміни поверхневого тертя.

Майже такий же результат був отриманий в роботі [131], де пластину завдовжки 45,7 см протягували в кільцевому лотку. Зниження тертя досягалося введенням полімеру з щілини на кожній стороні пластини біля передньої її кромки. Для визначення величини зниження тертя на пластині проводили дослідження струменя кільватера. Максимальне зниження опору до 50% було отримано при повільній ежекції розчину поліоксиетилену концентрацією $5 \cdot 10^{-5}$. Великі швидкості подачі розчину на пластину і великі концентрації значно знижували ефект. Очевидно, частина вказаного зниження тертя при великих концентраціях відбувалася завдяки пружності датчика, використаного для дослідження струменя кільватера.

Основним джерелом інформації руху плоскої пластини в розчині полімеру є робота [132]. Пластину довжиною 91 см (трохи скривлену для кращої відповідності відносному потоку) протягували в кільцевому лотку з швидкістю до 13,7 м/с, що відповідало $\text{Re} = 10^7$.

Турбулентне обтікання пластини при малих швидкостях (число Рейнольдса $3 \cdot 10^6$) забезпечували турбулізатором, розташованим перед пластиною. Тертя вимірювали на вагах. Весь лоток (ємністю близько 1600 м^3) заповнювали розчином поліоксіетилену концентрацією від $1,5 \cdot 10^{-6}$ до 10^{-4} . При концентрації $1,5 \cdot 10^{-6}$ було отримане зменшення тертя на 33%. Максимальне зниження 63% отримано при концентрації $1,5 \cdot 10^{-6}$, що показано на рис. 35.

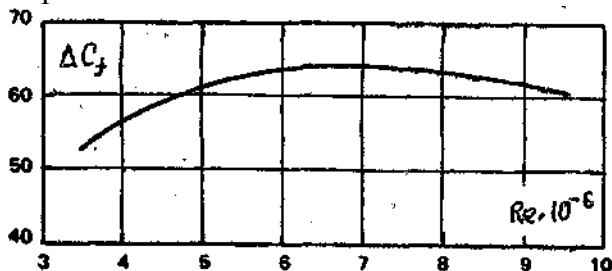


Рис. 35. Зменшення опору тертя, отримане на плоскій поверхні при обтіканні її поліоксіетиленом концентрацією $1,5 \cdot 10^{-5}$ [132].

За найбільших швидкостей протягування пластини було отримано зниження тертя до 60% при концентраціях від $1,5 \cdot 10^{-5}$ до 10^{-4} . Ці дані показують, що значне зниження тертя можна очікувати при зовнішньому обтіканні розчинами полімерів. Нведені дані добре відповідають максимальному значенню зниження тертя [24]. Виявленому максимальному зниженню тертя в розчині концентрацією $1,5 \cdot 10^{-5}$ при $Re = 6 \cdot 10^6$ відповідає коефіцієнт тертя, рівний 0,0013. Рівняння з роботи [24] дає значення $C_f = 0,0012$ при значенні $Re = 6 \cdot 10^6$.

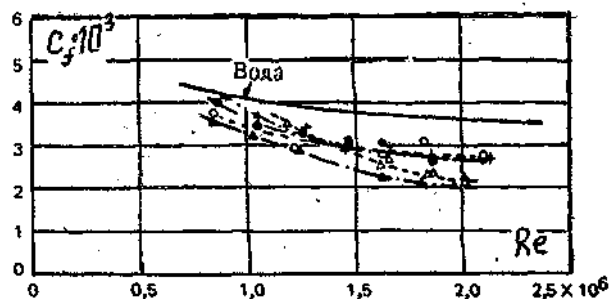
Дані роботи [133] добре погоджуються з даним роботи [132]. Де мова йде про зниження тертя на «передній кромці» пластини, але «передня кромка» інтерпретується дуже широко. Висока ефективність досягається при $Re = 6 \cdot 10^{10}$, які відповідають звичайним швидкостям корабля.

Експеримент, виконаний у Франції [134], показує, що при концентраціях поліоксіетилену $1,25 \cdot 10^{-7}$ виходить певний ефект. Максимальне зниження коефіцієнта тертя отримане при концентрації $1,25 \cdot 10^{-6}$. Максимальне зниження коефіцієнта тертя близько 48% отримано при $Re = 1,5 \cdot 10^{-6}$.

Цікавий експеримент на плоских пластинах був проведений в Берлінському буксирному лотку [135]. Гладка пластина із органічного скла довжиною 85 см була покрита 1,5%-ним розчином поліоксіетилену. Спочатку вона була висušена, а далі її буксировали в лотку при числі Рейнольдса $2 \cdot 10^{-6}$. Спочатку було зафіксовано зниження тертя на 10%, через 25 с опір зріс до значення, яке було до покриття пластини розчином. Результат показує на дію полімеру в тонкому пристінному шарі біля пластини, що не суперечить результатам, отриманим раніше в трубах.

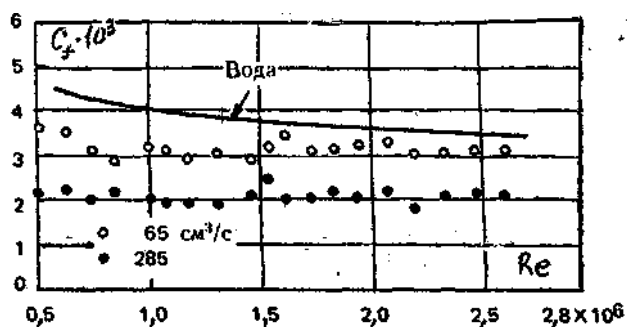
У роботі [136] вимірювали зниження опору плоскої пластини довжиною 250 см при витіканні розчину поліоксіетилену на передню кромку. Вимірний коефіцієнт тертя був знижений на 50% ($Re = 2 \cdot 10^{-6}$) при концентрації $2 \cdot 10^{-6}$ (рис. 36).

Рис. 36. Результати введення розчинів поліоксіетилену на передню кромку плоскої пластини 2500×311 мм [136]: подача, $\text{см}^3/\text{с}$ — $\circ$ — 130, $\bullet$ — 200, $+$ — 310 при концентрації 10^{-4} ; подача, $\text{см}^3/\text{с}$ — Δ — 110, $\blacktriangle$ — 140 при концентрації $2 \cdot 10^{-4}$.



Випробування пористої пластини з рівномірною подачею розчину полімеру по всій поверхні обох сторін пластини розміром 1800×316 мм описані в роботі [137]. Для випадку, показаного на рис. 37, питома об'ємна швидкість подачі розчину поліоксіетилену концентрацією $3 \cdot 10^{-4}$ була 0,0057 і 0,025 $\text{см}^3/(\text{с} \cdot \text{см}^2)$ відповідно. Отримані зміни коефіцієнта тертя ясно свідчать, що ефект може бути значним, якщо полімер знаходиться близько до стінки.

Рис. 37. Вплив подачі через пористу стінку пластини розчину поліоксіетилену концентрацією $3 \cdot 10^{-4}$ на коефіцієнт опору.



Гренвіль [138] аналітично розглянув проблему зниження тертя при подачі полімеру через щілину. Перелік експериментальних даних по витратах і концентрації полімеру і ширині щілини для отримання зниження опору на плоскій пластині при швидкостях 2,44 м/с наведений у роботі [139]. Було виявлено, що кращою є вузька щілина. Розчин необхідно випускати з швидкостями, близькими до швидкостей у в'язкому підшарку при оптимальній концентрації розчину рівній 10^{-4} .

У деяких роботах розчини полімеру подавали на поверхню циліндрових тіл для зменшення їх опору. У роботах [140, 141] виявлено істотне зниження тертя на циліндрових тілах при подачі полімеру в передній частині тіла. У роботі [142] також виявлено зниження опору на циліндрових тілах, занурених в розчин полімеру. У роботі [141] спостерігалось 23%-не зменшення опору на моделі торпеди діаметром 127 мм і завдовжки 1270 мм при вбризуванні 0,1%-ного розчину поліоксіетилену з отвору біля головки при буксируванні ($Re=2,9 \cdot 10^6$). На цій швидкості необхідно збурювати пограничний шар і забезпечувати турбулентне обтікання при відсутності полімеру. Очевидно, що вплив полімеру на турбулентний потік у циліндра значний, що і показане на рис. 38.

Рис. 38. Вводилася фарба з циліндричного пристрою в турбулентний потік води (ліворуч) і в розчин поліоксіетилену концентрацією $3 \cdot 10^{-5}$. Тіло (праворуч) рухається з більшою швидкістю за рахунок 35%-го зменшення опору тертя.



5. ТЕОРІЇ ЗМЕНШЕННЯ ОПОРУ ТЕРТЯ

Кінцевий науковий результат вивчення розчинів полімерів, що зменшують тертя, — розуміння взаємодії макромолекул в потоці. Оскільки ми погано уявляємо собі багато аспектів турбулентного потоку навіть в ньютонівських рідинах, відомості, отримані при вивченні потоку, сильно збуреного молекулами полімеру, можуть сприяти розумінню основних закономірностей потоку. З погляду фахівця з прикладної гідродинаміки розуміння фундаментальних принципів, що лежать в основі зниження опору тертя, може сприяти більш ширшому застосуванню полімерів у техніці.

Було запропоновано декілька теорій для пояснення зменшення тертя. Але до цих пір жодна з них не має достатньої чіткості. У цьому розділі зроблено огляд теоретичних робіт зі зменшення тертя для того, щоб розробити плани для подальших робіт.

5.1. Зменшення в'язкості із зростанням швидкості зсуву — ефект стінки.

В одній з перших робіт по розчинах полімерів, що знижують тертя, Томс [5] припустив можливість існування в потоці потоншеного при зсуві пристінного шару, який завдяки меншій в'язкості даватиме менші коефіцієнти тертя, ніж розчинник. Ця точка зору була заснована на ранніх теоріях Олдройда. У дискусії до статті Томса можливість існування ефекту стінки була поставлена під сумнів; проте до тих пір, поки не були отримані реограми полімерів, що знижують тертя [16, 17], важко було категорично заперечувати існування підшарку з дуже низькою в'язкістю — нижче, ніж у розчинника. Реограми поліоксіетилену і розчинів гуарової смоли показали, що розбавлені розчини, які знижують тертя не мають шару, що стає тоншим при зсуві, і фактично є ньютонівськими при звичайних методах вимірювання в'язкості. Тільки при концентраціях багато більших, ніж

потрібні для оптимального зниження опору, виявлялися неньютонівські ефекти і тоді потоншення при зсуві приводило до значно більшої в'язкості в розчинах, ніж в розчиннику.

Цій теорії була завдана нищівна критика в роботі [143], в якій було показано, що розчини поліметакрилової кислоти, дилатантної речовини (яка дає потовщення при зсуві пристінних шарів), при концентраціях в декілька десятих частин відсотка також сильно знижували тертя при лужному рН. Пізніше Ламлі [144] показав, що на турбулентність не повинні помітно впливати зміни в'язкості із-за зсуву, оскільки над в'язкістю домінують сили інерції. Таким чином, теорія зменшення в'язкості із зростанням швидкості зсуву не може бути підтверджена.

Звертає на себе увагу ще одна проблема, пов'язана з «ефектом стінки». Було зроблено припущення про можливе виникнення шару абсорбції молекул полімеру на внутрішній стінці труби або іншої поверхні. Шар абсорбції «знижує в'язкість біля стінки, створює ефект ковзання, гасить турбулентні пульсації і перешкоджає вихороутворенню біля стінки» [145]. Така точка зору була вперше висунута Ельперінім і ін., проте вже в роботі [146] аводилися досліди, в яких через трубку малого діаметру спочатку протікав розчин полімеру, а потім чистий розчинник. Певний час спостерігалось зменшення тертя, указуючи на те, що шар абсорбції поволі змивався. У [34] також спостерігався очевидний ефект абсорбції. Пізніша робота [147] з прозорою трубкою і забарвленим полімером показала, що «абсорбція» була фактично обумовлена похибкою експерименту (деяка кількість полімеру, захоплена в трубках манометра, поволі дифундувала в потік розчинника). У [148] автори пішли далі в цьому напрямі і на дисках, що оберталися, показали, що зміна матеріалу і диску не змінює зменшення опору в розчинах полімерів. З цих даних і інших експериментів, які показали, що молекули полімеру абсорбуються або прилипають до чистих поверхонь тонкими шарами без великих скупчень, які проходять на велику глибину в розчин, витікає, що абсорбція полімеру на поверхнях не пов'язана з явищем зниження тертя.

Таким чином, не можна однозначно вказати, що конкретно сприяє явищу зменшення тертя: чи то абсорбовані на стінці шари, чи то зменшення в'язкості при зсуві біля стінки, або якийсь інший прояв специфічної взаємодії макромолекул або частинок із стінкою.

5.2. Нормальні напруги

Інтуїтивно можна зрозуміти, що при описі зменшення тертя необхідно враховувати певну зміну властивостей полімерного розчину під час руху в пограничному шарі в порівнянні із звичайною рідиною. Одна з можливостей для істотного зменшення збурень, що породжуються турбулентними пульсаціями, могла б бути неізотропна в'язкість, тобто в'язкість, яка мала у напрямі руху і досить велика в будь-якому іншому напрямі. Відмінності в «нормальній напрузі» могли б приводити до такого явища.

У роботі [149] виведені рівняння кількості руху для двовимірної турбулентної течії із зсувом рідини, що має звичайну в'язкість у напрямі зсуву, а також компоненти поперечної в'язкості. На додаток до звичайних рівнянь для ньютонівської рідини з'явилися нові вирази, які допускають додаткові напруги, що зменшують перенесення кількості руху в турбулентному пограничному шарі і які можуть служити механізмом зниження опору тертя.

У роботі [150] була зроблена спроба заміряти нормальну напругу в розчинах поліоксіетилену, поліакриламідів і гуарової смоли. Концентрація кожного розчину підбиралася так, щоб всі розчини однаково зменшували опір. Результати цієї роботи показують, що в розчині поліоксіетилену є різниця в компонентах напруги, але її немає в двох інших рідинах, що знижують опір. Висновком цієї роботи є відсутність явного зв'язку між ефективним зниженням турбулентного тертя і відмінностями в нормальній напрузі у розчинів.

У роботі [151] використовувалася модель Максвелла для обчислення зменшення інтенсивності турбулентності у ряду полімерних розчинів в порівнянні з розчинниками. Це зниження у подальшому порівнювалося із дослідним коефіцієнтом зменшення опору, отриманим на полімерних розчинах. В'язкопружна модель вимагала оцінки різниці нормальних напруг, яка була експериментально отримана вимірюванням тяги, створеної

струменем полімерного розчину. Різниця нормальної напруги була значною, але розчини, що використалися, були надзвичайно насиченими речовинами, що знижують опір, і тому володіли явною в'язкопружністю. Питання про застосовність розрахунків, викладених в [151], до надзвичайно розбавлених розчинів поліоксіетилену є спірним. Проте розрахунки узгоджуються з вимірюваннями зменшення опору для використовуваних розчинів.

Експериментальна оцінка в'язкопружних властивостей розчинів поліоксіетилену все ж таки указує на те, що проста модель Максвела не може пояснити дослідні зміни у величинах в'язкості і пружності із зміною частоти турбулентних пульсацій. У роботах [152, 153] показано, яке повинно бути розподілення елементів Максвела для пояснення властивостей розчину поліоксіетилену.

У роботах [154, 155] з математичним підходом об'єднані основне рівняння, що включає вираз для нормальної напруги, з рівняннями руху і виведені диференціальні рівняння, схожі з рівняннями Нав'є-Стокса, але набагато складніші. Аналізуючи стійкість ламінарного течії, автори виявили, що в'язкопружність повинна дестабілізувати течію, тобто легше може початися перехідний режим течії. Вважається, що зниження опору тертя при турбулентній течії є функцією числа Вейссенберга в ступені $1/3$, тобто

$$(W_n)^{1/3} = \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma} \tau_0^3}{\eta_0 \dot{\gamma} \tau_0^3} \right)^{1/3}.$$

Порівняння теорії з експериментальними даними показує, що вони не узгоджуються, оскільки добавки полімеру, мабуть, затримують перехід. Ймовірно, необхідні деякі емпіричні поправки для приведення у відповідність з даними для турбулентного потоку. Таким чином, ці розрахунки можуть дати лише загальну основу для вивчення полімерних розчинів, що зменшують тертя.

У роботі [156] також передбачається дестабілізуючий вплив в'язкопружності, але, що важливіше, введена складова вихрування у напрямі руху.

З іншого боку, в роботі [157] запропонована нова теоретична модель турбулентного потоку із зсувом, з якої виходить не тільки велика стабільність підшарку, але і збільшення повздовжніх пульсацій при течії полімерних розчинів. За допомогою візуалізації потоку автор виявив, що турбулентна течія в трубі формується за рахунок серії нестійких утворень, які рухаються разом з потоком і створюють вихорі у формі підкови. Із запропонованої в роботі [157] моделі витікає, що полімерні добавки повинні збільшувати стійкість підшарку і повздовжні пульсації швидкості.

5.3. Витягування молекул.

У роботі [158] вдалося візуалізувати молекули полімеру, дуже сильно витягнуті у напрямку зсуву, що забезпечує жорсткість, за рахунок якої поглинається енергія турбулентних вихорів, а потім випромінюється у вигляді пружних хвиль зсуву, які в подальшому руйнуються силами в'язкості. Автор припускає, що жорсткість обчислюється як добуток концентрації на корінь квадратний з молекулярної маси, посиляючись на експериментальні дані роботи [16]. Після декількох достатньо загальних припущень робиться висновок, що дисипація турбулентної енергії в полімерному розчині, що має дану інтенсивність турбулентності, може бути в три рази більше, ніж в звичайній рідині. Збільшення дисипації приводить до пропорційного збільшення товщини підшарку пограничного шару і, таким чином, до зниження опору.

Ламлі [159] для пояснення потовщення ламінарного підшару також використовує поняття розтягування молекул, але розрахунок їх подовження указує на дуже слабкий ефект. (У роботах [160...162] виявлено тільки дуже незначне подовження макромолекули в зсувному потоці. Максимальне співвідношення осей, визначене експериментально, складає приблизно 1,5.) Оскільки подовження молекул незначне, Ламлі припустив, що заплутування молекул обумовлене їх взаємодією і збільшенням вихорів у підшарку. При їх розповсюдженні поперек потоку утруднюється утворення вихорів у напрямку потоку. Аналізуючи експерименти за течією Куетта, в яких число Тейлора, що характеризує появу

тейлорівських вихорів, збільшується у присутності полімерів, Ламлі прийшов до висновку, що збільшується і число Рейнольдса течії у в'язкому підшарку плоского потку. Отже, підшарок товщає, а опір зменшується.

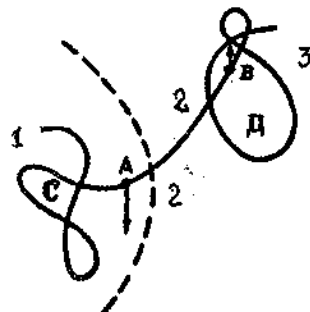
Проте за допомогою гіпотези «заплутування молекул» важко пояснити виявлене у роботі [163] зниження опору при течії в трубі надзвичайно розбавлених розчинів поліоксіетилену концентрацією $3 \cdot 10^{-8}$. Було підраховано, що при такій концентрації відстань між центрами молекул поліоксіетилену була приблизно в 26 разів більше радіусу інерції молекули; відносний об'єм, зайнятий полімером був $\sim 0,00003$. При таких відстанях між молекулами і відносному об'ємі частинок здається неправдоподібним, щоб заплутування молекул могло відіграти певну роль.

По даним роботи [164], розчини поліоксіетилену різної молекулярної маси дають однакове зменшення опору, якщо концентрація (для кожного значення молекулярної маси) задається коефіцієнтом від вирахованої концентрації полімерних клубків у випадку дотику один до одного (тобто «критичній» концентрації). Наприклад, за даними роботи [164], для отримання зменшення опору на 40% в трубі діаметром 0,109 см при $Re = 14\ 000$ концентрація поліоксіетилену повинна складати одну соту частину «критичної» концентрації для будь-якої молекулярної маси. Подібні розрахунки були зроблені в [165], де проаналізована велика кількість експериментальних робіт з використанням представлення «еквівалентної концентрації», а саме виявлено, що для однакового зменшення тертя зайняті полімерами об'єми повинні бути рівні (грунтуючись на розгляді гідродинамічних сфер) в широкому діапазоні молекулярних мас.

Проте деякі експерименти [166] приходять до інших висновків і свідчать про агрегацію молекул в розчині, що знижує опір. Було показано, що полімерні розчини, що зберігаються в скляному посуді декілька тижнів, менше знижували тертя, ніж тільки що приготовані. Звичайно, зменшення тертя в розчинах полімерів при їх зберіганні може відбуватися з різних причин і не виключена вірогідність того, що спостерігався зовсім інший ефект, а не розплутування молекул.

Пфеннінгер [167] заснував свою теорію на гіпотезі, що початок переходу в звичайних рідинах супроводжується розвитком так званих «шпилькових вихорів» (hairpin vortices), які з'являються внаслідок збурень або посилених коливань в пограничному шарі. Шпилькові вихори викликають швидкості збурення в пограничному шарі, які у свою чергу викликають появу додаткових шпилькових вихорів. Такі вихори кінець кінцем стають нестійкими і руйнуються. Пфеннінгер припустив, що вплив добавок полягає у взаємодії і ослабленні аихрування із-за витягування і деструкції молекул полімеру. Молекули частково поглинають кінетичну енергію вихорів, за рахунок чого останні збільшуються, і, перш ніж вони стають нестійкими, вихори проникають достатньо далеко від стінок, що приводить до потовщення ламінарних підшарків і до зменшення тертя.

Рис. 39. Схема можливої дії витягування полімерних макромолекул на зменшення опору тертя [168]. Сили, що діють на садини *С* і *Д* молекулярного клубка подані векторами *А* і *В*, викликають розтягування молекул, які знаходяться в зонах: 1 – мікрховиль; 2 – чисто дилатантної течії; 3 – незбуреного потоку.



Петерлін [168] запропонував подібну модель, схема якої ілюструється на рис. 39, де показано, що шляхом механічного втручання можна погасити турбулентність. Як видно, один кінець макромолекули лежить усередині «мікрровихору», а інший – зовні.

При такому розташуванні молекули проміжна ділянка натягається, що приводить до розтягування молекули, поглинання енергії і розсіювання вихору. У роботі [169] цю ідею представлено декілька в іншому вигляді. Передбачається, що турбулентні вибухи, спостережувані в турбулентній течії води, пригнічуються полімерними молекулами. Цей підхід вдосконалений в роботі [170], де врахований сильний опір розтягуванню, яке спостерігалось іншими дослідниками. Зроблено припущення, що якщо частота викиду

турбулентних вибухів залишається незмінною в полімерних розчинах, то опір розтягуванню зменшує величину вибухів і звідси течія стає менш турбулентною. Вимірювання, проведені в [171], показують, що в потоці полімерного розчину зменшується діапазон розмірів турбулентних вихорів.

5.4. Припинення утворення турбулентності

Астаріта [172] вважав, що турбулентність у в'язкопружних рідинах не з'являється, бо є процесом менш дисипативним, ніж у в'язких рідинах. Гедд [173, 174] припустив, що зниження тертя викликається не дисипацією турбулентної енергії, а гальмуванням утворення турбулентності. У роботі [143] була висловлена точка зору, що концепція Гедда — важливий крок для розуміння механізму зниження тертя. Результати Пфеннінгера [167] підтримують припущення про те, що полімерні добавки перешкоджають утворенню турбулентності. У роботі [175] показано експериментально, що за наявності полімеру в пограничному шарі, що розвивається, спостерігається зменшення утворення дрібних вихорів.

Уолш [143, 176] висунув найбільш вичерпну в даний час теорію зниження тертя. Він почав з розгляду малих збурень у в'язкому шарі, які зростають за рахунок отримання енергії з місцевого профілю швидкості під впливом напруги Рейнольдса. Збурення мають тенденцію до втрати енергії із-за в'язкої дисипації. У полімерних розчинах передбачається, що молекули полімеру обумовлюють збереження енергії цих малих збурень. Якщо мале збурення отримує більше енергії, ніж втрачає, воно росте. Збурення або вихори, що утворюються таким чином, рухаються від стінки, оскільки вони переносяться вниз за течією. Таким чином, збурення на межі в'язкого підшарку остаточно стають частиною турбулентного руху і на зовнішній межі пограничного шару і врешті-решт починають визначати напругу Рейнольдса в турбулентній течії.

Основна ідея цієї теорії полягає в тому, що великомасштабні збурення, які створюють напругу Рейнольдса, раніше були малими збуреннями на межі в'язкого підшарку декілька далі за течією. Якщо невеликі збурення почали рости, то впливом полімерних молекул можна нехтувати. Молекули полімеру тільки трохи змінюють енергетичний баланс турбулентних пульсацій біля стінки, що дають можливість в'язкій дисипації ліквідувати збурення, які, якби не було молекул полімеру, мали достатньо кінетичної енергії для зростання.

Полімерні молекули змінюють структуру турбулентності в зовнішній частині пограничного шару чи шляхом зменшення числа збурень, які ростуть на одиниці площі в часі і виносяться за межу в'язкого підшару. Це змінює іриводит до зниження напруги Рейнольдса і до зменшення тертя.

Уолш скомбінував рівняння руху з дуже загальним рівнянням стану і виразив фізичне значення різних членів у загальному виразі для потоку біля стінки. Параметр H тут визначається так:

$$H = \frac{\rho \bar{u}^2 \delta^+}{\eta \tau_w} = \frac{\rho \bar{u}^2 \delta^+}{\eta \tau_w}.$$

Параметр H — безрозмірне число, що оцінює вплив полімерних молекул на швидкість утворення турбулентності поблизу стінки. При $H \rightarrow 1$ значна частка енергії, яка в звичайних умовах виносилася від стінки турбулентними збуреннями, буде виноситися полімерними молекулами. Можна оцінити величину H через відомі величини:

$$H = \frac{8cM|\eta|^2\tau_w}{RT},$$

де c — концентрація, M — молекулярна маса, $|\eta|$ — характеристична в'язкість, τ_w — напруга зсуву на стінці, R — газова стала, T — температура.

Уолш прийняв, що $H_{\text{крит}}$ (початок зниження тертя) дорівнює 0,01, і у міру наближення $H \rightarrow 1$ зниження тертя досягає максимуму. Ця теорія обмежена малими значеннями швидкостей деформацій, але вона охоплює області, де є численні експериментальні дані.

Використовуючи матеріали роботи [120], автор знайшов, що $H_{крит}$ дорівнює приблизно 0,02, а крива залежності величини зниження тертя від H корелює всі дані як по поліоксетилену у воді, так і по поліізобутилену в циклогексані (рис. 40). Форма кореляційної кривої добре узгоджується з передбаченою Уолшем.

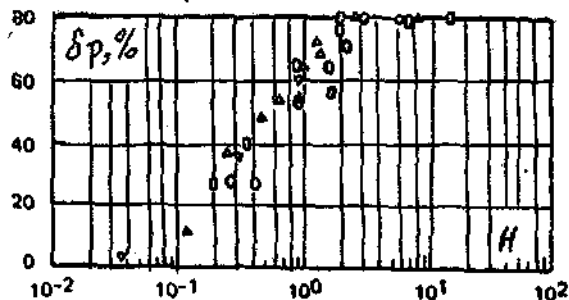


Рис. 40. Кореляція результатів роботи [180] з використанням параметра Уолша H . Наведені дані за двома системами полімер – розчинник з різними молекулярними масами і з 30 різними концентраціями

$$[176] \delta p = \frac{\Delta p_p - \Delta p_n}{\Delta p_n - \Delta p_{eai}} \cdot 100, \text{ де } \Delta p_p - \text{перепад тиску}$$

під час течії розчинника; Δp_n – перепад тиску під час течії розчину полімеру; Δp_{eai} – перепад тиску при

екстраполяції ламінарної течії.

Таким чином, для малих швидкостей деформації і розбавлених розчинів величина H може бути розрахована без введення довільних констант. Уолш виходить з того, що зниження тертя пов'язане з течією біля стінки. Згасання турбулентності в струмені за даною теорією розрахувати не можна.

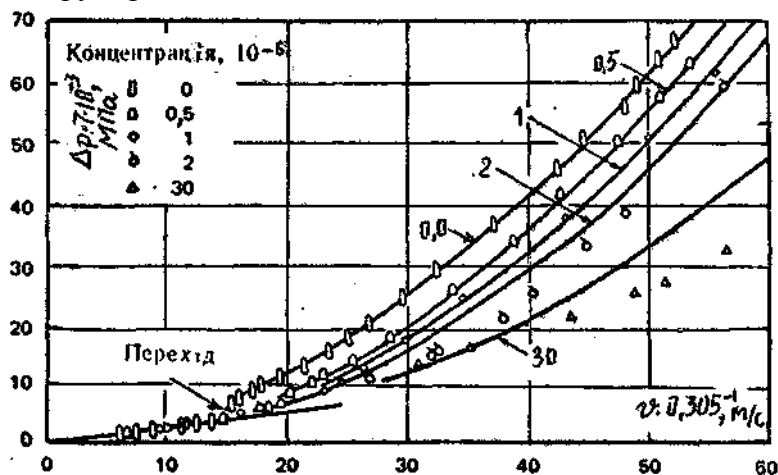
При більших швидкостях деформації необхідно ввести додатково довільну постійну, переписавши свою формулу в наступному вигляді:

$$v = k_1 \left(\lg \frac{C}{\rho_0} + k_2 \right) (\delta_1 - \delta_2)^{0,5},$$

де v – швидкість у даній трубці для даного полімеру; $k_1 = (2D/\rho_0 L)^{0,5}$; K_2 – стала величина, залежна від трубки і властивостей молекули; $(p_1 - p_2)$ – падіння тиску на довжині трубки L ; ρ_0 – густина розчинника, D – діаметр трубки.

Таким чином Уолш зміг скорегувати дані Уайта (рис. 6), використовуючи цей метод (рис. 41) і пояснити ефект зниження опору тертя.

Рис. 41. Порівняння теоретичних кривих [176] (суцільні лінії) з дослідними результатами, отриманими в турбулентному реометрі для розчинів поліоксетилену [28].



Припущення Уолша про те, що добавки полімерів ефективно зменшують тертя тільки в пристінній області, ґрунтуються на результатах точних експериментів [177], у яких подавали полімери через трубку з пористими стінками в потік води.

Детальні профілі концентрацій і швидкостей і дані по напрузі зсуву на стінці підтверджують, що товщина в'язкого підшару збільшується і що зниження опору спостерігається в нижніх частинах трубки, де полімер стикався тільки із стінками, а усередині трубки текла чиста вода.

У роботі [178] шляхом детальних вимірювань пульсацій тиску на стінці показано, що в порівнянні з ньютонівськими рідинами енергія турбулентності зменшується на високих частотах; зменшення високочастотних складових, відповідальних за велику частину втрат енергії в пограничному шарі, пояснює зменшення ступеня турбулентності в полімерних потоках, що знижують опір тертя.

5.5. Витягування вихорів

Гедд [174] припустив, що при зниженні опору має місце процес витягування вихорів уздовж стінки. Передбачається, що опір витягуванню вихору приводить до зменшення перемішування і швидшого згасання вихрового руху. У [179] розвивається ця думка і доказується, що витягування може ефективно позначатися тільки на малих вихорах поблизу стінки.

У роботі [180] було виявлено помітний опір розтягуючій напрузі в слабких полімерних розчинах. Для розчину поліакриламиду концентрацією 10^{-4} була виміряна при розтягуванні в'язкість, яка в декілька тисяч разів більша, ніж в'язкість зсуву для стаціонарного випадку. Отже, опір витягуванню вихорів може легко спостерігатися візуально навіть для сильно розбавлених розчинів полімерів. Можливо, що цей механізм є відповідальним за зниження опору.

Результати [55, 89] показують, що зниження опору явно має місце в області, безпосередньо прилеглій зовні до підшару $5 < y^+ < 50$. Тому опір витягуванню вихорів може бути легко поясненим ефективністю дії полімеру в цьому буферному або «пружному» шарі.

5.6. Деякі не вирішені питання

У теоріях, що пояснюють ефект зниження тертя, залишається ще багато нев'яснених питань, на які поки що немає відповіді. Наведемо деякі з них.

Чи бере участь в'язкопружність у зниженні тертя. У даний час більшість теоретиків вважають, що в'язкопружні властивості полімерних розчинів якось пояснюють зниження тертя. Тоді як вплив в'язкопружних властивостей очевидний в насичених розчинах, в розбавлених розчинах з в'язкістю, близькою до в'язкості розчинника, часто не спостерігається ніякого помітного в'язкопружного ефекту, окрім ефекту зниження тертя. Такі розчини, як розчини поліоксіетилену, при роботі з якими потрібно вносити поправки до вимірювань за допомогою трубок Пито, при досить низькій концентрації зазвичай втрачають цей ефект в'язкопружності в результаті старіння і використання [181], але навіть в них після старіння і використання не було зміни спроможності до зниження тертя. Суенсон інтенсивно перемішував розчин поліоксіетилену концентрацією $4.5 \cdot 10^{-3}$ протягом 24 год., після чого повністю зникав ефект Вейссенберга (підймання по обертовому стрижню мішалки) і в'язкість розчину падала більш ніж в 2 рази в порівнянні з первинною величиною. Проте вимірювання величини тертя через кожні декілька годин в розчинах, які розбавлялися до $4.5 \cdot 10^{-6}$, не показали ніяких змін в здатності полімерного розчину знижувати тертя, яке незмінно становило 60%. Дані роботи [150] по нормальній напрузі також указують на те, що як пружні, так і непружні рідини можуть знижувати опір. Фебула [182] припустив, що в тільки що перемішаних розчинах можуть знаходитися скупчення молекул, які розпадаються з часом. У роботі [181] виявлено, що різниця у величинах нормальної напруги, виміряна в свіжоприготованих розчинах поліоксіетилену, зникла в процесі старіння розчину.

У роботі [183] показано, що температурні профілі полімерних струменів, які витікають в рідину, в якій підтримувалася інша температура, помітно змінювалися залежно від того, чи використовувався раніше розчин поліоксіетилену для зниження в'язкопружності чи ні. Властивість цих розчинів зменшувати опір залишалася незмінною. Гуаровая смола, яка має меншу в'язкопружність, ніж розчини поліоксіетилену, поводити себе аналогічно вже працюючому розчину поліоксіетилену, який у свою чергу вів себе аналогічно воді. Таким чином, в'язкопружні проявлення свіжоприготованих розчинів поліоксіетилену є лише побічним ефектом властивостей зниження опору.

У точному експерименті, в якому пьезодатчик поміщався в стінці кільцевої трубки, по якій рухалася рідина, що знижує опір [44], не виявлено впливи швидкості зсуву на вимірювані пружні параметри рідини. Таким чином, ці властивості не впливають на зміну характеру потоку, якщо має місце зниження опору.

Можна припустити, що в'язкопружність і зниження тертя зв'язані вельми слабо. Властивості

розчинів карбополу, які є дуже вязкоупругими, але не знижують тертя, також говорять про необхідність переглянути роль в'язкопружності.

Чи потрібна стінка? По теорії Уолша для зниження тертя необхідна наявність пограничного шару біля стінки. Проте були продемонстровані аномальні ефекти у струменях і у вільній турбулентності, де полімери істотно змінювали характер струменів і швидкість розповсюдження вільної турбулентності. Доцільно визначити, чи зв'язані ці ефекти з в'язкопружністю або з якою-небудь іншою, поки що не вивченою властивістю полімерних розчинів, що знижують тертя.

Чому хімічні ефекти незначні? Як ми бачили, хімія речовин, що зменшують опір, повністю визначається величиною атомної маси, лінійністю молекул і розчинністю полімерів. Найефективніший полімер, поліоксіетилен, найбільш лінійний. Аналогічні ефекти можна отримати при високих концентраціях менш лінійних речовин. Було показано [184], що тверді частинки і волокнисті матеріали, розподілені в потоці, також знижують турбулентне тертя. Якби ми розглядали явище, що включає макромолекулярне розтягування або деформації, не ясно, яка була б роль частинок і волокон. Чи чисто механічним є вплив макромолекул і частинок?

Чому перестає падати опір після досягнення певної концентрації? Експериментально встановлено, що збільшення концентрації полімеру понад деякий оптимум, залежний від типу добавки і гідродинамічної ситуації, призводить до зменшення зниження опору в порівнянні з оптимальною величиною. У роботі [185] вказано, що жодна із запропонованих теорій не пояснює цього збільшення при зростанні концентрації. Чи відбувається це тільки завдяки зростанню в'язкості?

Висновок. Всі до цих пір висунуті теорії дуже легко піддати критиці; набагато важче висунути прийнятні альтернативи. Все ж таки зі розглянутих робіт виходить одна важлива обставина: молекули полімеру повинні впливати на утворення турбулентних вихорів таким шляхом, який менш дисипативний, ніж саме зародження вихорів. Крім можливості поглинання і запасання енергії або випромінювання її з пограничного шару, залишається можливість, що пасивні молекули, що знаходячись в потоці, механічно взаємодіють зі збуреннями, які утворюють турбулентні вихори.

6. ЗАСТОСУВАННЯ

Оскільки наука про полімери, що знижують опір, тільки зароджується, відзначимо лише деякі області, де намітився певний прогрес.

6.1. Перекачування води і нафти

Першим застосуванням добавок, що знижують опір, було використання високополімерних матеріалів, особливо гуарової смоли, при гідравлічному розриві пласта в нафтових свердловинах. В цьому методі, після того, як свердловина пробурена, суміш води з піском закачується під великим тиском в нафтомістку скелясту породу. Порода руйнується із-за великого тиску, а пісок перешкоджає зімкненню тріщин. Іноді додаються смоли або загущаючі речовини для того, щоб поліпшити зависання піску у воді. Властивість гуарової смоли зменшувати опір була виявлена аналогічним чином. Застосування гуарової смоли при нафтовидобутку вже відпрацьоване. Проведені розрахунки оцінок опору тертя для труб, вживаних в нафтових свердловинах з різними концентраціями добавок [186].

У роботі [26] вивчалася економічна сторона використання добавок і приведена номограма для оптимальних концентрацій добавок гуарової смоли залежно від глибини свердловини, швидкості подачі і повного об'єму рідини, призначеного до перекачування по обсадній колонії свердловини діаметром 14 см. Використовуючи оптимальну концентрацію, визначену по номограмі, можна сказати, що необхідна потужність зменшується більш ніж в 5 разів в порівнянні з випадком використання чистої води для розриву пласта.

Успіхи застосування полімерних добавок в нафтовидобувній промисловості у великій мірі залежать від швидкості розмішування полімерних добавок; тому було досліджено вплив

геометрії ежектора. У [187] вивчали ежектори, розташовані як в центрі труби, так і по стінках її. Коли 0,1%-ний розчин гуарової смоли вприсувався в потік води в центрі труби, необхідна була довжина близько 20 калібрів для рівномірного розподілу добавки, що було визначене по вимірюваннях зниження опору. Тертя ж біля стінок вже через 10 калібрів було нижче за значення, відповідне рівномірному розподілу із-за більш концентрованого розчину гуарової смоли біля стінок. При використанні щілинного ежектора зниження опору спочатку навіть сильніше, ніж відповідне рівномірній концентрації, яке досягалося після ~ 5 калібрів. Аналогічні результати були отримані для поліоксетилеу [188].

Щілинний ежектор з геометрією, схожою на ту, що застосовувалася в [187], використовували в роботі [44], де вивчали вплив ширини щілини і концентрації полімерів, що ежектувалися. зокрема поліакриламиду і поліоксетилеу. Результати показують, що з цим типом ежектора можна значно зменшити опір.

Ежектори з аналогічною геометрією досліджувалися для управління пограничним шаром на плоских пластинах. У [189] виявлено, що похилий щілинний ежектор давав якнайкращі результати з чотирьох видів ежекторів, зображених на рис. 42.

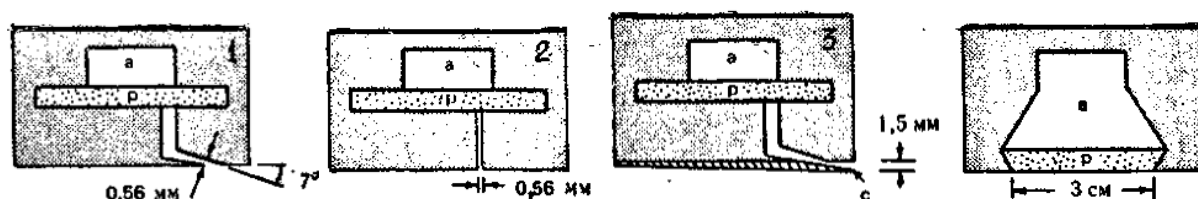


Рис. 42. Зразки ежекторів різної геометричної форми для введення полімерних розчинів на плоску пластину. Згідно [189], ежектор з похилою щілиною май найкращі характеристики: 1 – ежектор з похилою щілиною; 2 – ежектор з вертикальною щілиною; 3 – ежектор з екранованою щілиною; останній – ежектор з пористою пластиною; a – смінь; c – латунний екран; p – пориста пластина.

Питання про те, в трубі якого максимального розміру вдається ще понизити опір, виявлося спірним. На основі проведеного теоретичного аналізу [190] передбачається, що ефект зменшення опору в трубах діаметром близько 30,5 см не з'являється до тих пір, поки число Рейнольдса не досягне величини вище за «практично використовувані значення». З іншого боку, в роботі [191] високі зниження опорів екстрапольовані для труб діаметром до 6,1 м. Експериментальних даних для великих труб небагато, зокрема випробування в трубі діаметром 25,4 см [37] і в колекторі діаметром 61 см [192]. Таким чином, розмір труби, число Рейнольдса, за винятком надзвичайно високих значень, і порогове значення напруги зсуву не обмежують прояви ефекту зниження опору.

Хоча в більшості робіт досліджували водні розчини, в [49] було показано, що нафта і гас можуть змінити свої властивості при додаванні високомолекулярного поліізобутилану і сильно зменшити турбулентне тертя. Значні зниження опору можуть бути отримані для нафти. Основна перешкода для широкого застосування полімеру полягає в його деструкції (точніше деградації властивостей полімерного розчину). Була відмічена слабка деструкція нового матеріалу в дизельному паливі при випробуваннях в трубопроводі діаметром 16 см і завдовжки 10,7 км., хоч сильна деструкція викликала багатоступінчастим відцентровим насосом [193]. Зниження опору до 37,5%, відповідне зменшенню потужності насоса на 30%, спостерігалось при концентрації розчину $6,2 \cdot 10^{-5}$. Надійні результати були отримані при випробуваннях в нафтопроводі діаметром 30,5 см і завдовжки 61,5 км. [194]. З появою стійких до деструкції полімерів ця техніка може знайти широке застосування.

Порі та ін. [195] показали, що суспензії піску можна перекачувати при значно понижених потужностях, використовуючи полімер або знижуючий опір мило в суспензії. Використання секретного полімеру при концентрації $3,6 \cdot 10^{-4}$ дало 30%-не зменшення втрати натиску при транспортуванні суспензії частинок шлаку по магістралі діаметром 15,2 см, завдовжки 805 м при витраті $227 \text{ м}^3/\text{год}$. Частинки шлаку проходили через сітку з квадратними отворами розміром 2,54 см, але затримувалися сіткою з отворами 1,27 см; використовувалася суспензія з об'ємним вмістом шлаку 7%. Інші полімери і суспензійні

матеріали дали не такі високі результати, хоча хороші зниження опору були отримані на чистій воді [196].

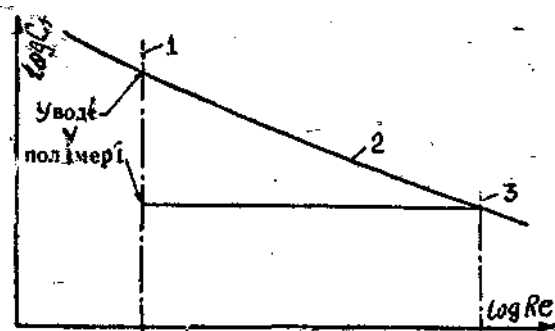
6.2. Наукові дослідження

Багато чого можна чекати від використання зниження опору при вивченні молекулярних властивостей. Це явище корисне при визначенні молекулярних мас [197] і при вивченні молекулярних конфігурацій [198]. Запропоновано використовувати зменшення опору як метод дослідження реакцій полімеризації, в біологічних системах [199].

6.3. Випробування моделей суден

При випробуванні, моделей суден витримується подібність за числом Фруда. Проте при цьому виявляється заниженим приблизно в 100 разів число Рейнольдса. Використання високомолекулярних полімерів допускає можливість витримати подібність і по числу Фруда, і по числу Рейнольдса. У роботі [130] відмічається, що зменшені коефіцієнти опору в розчинах полімерів відповідають більшим числам Рейнольдса потоку води, як схематично показано на рис. 43. Модельні експерименти з використанням розчинів поліоксіетилену в гидроканалі показані на рис. 44. Аналогічні результати на моделі міноносця надані Ковальським [200]. В обох проведених експериментах в резервуарах відсутність тривалої стабільності полімеру приводила до невизначеності результату. Щоб вирішити цю проблему, було запропоновано [201] виростити в резервуарі у великих кількостях прісноводу водорість *Porphyridium aegugineum*. Ця водорість легко росте в прісній воді, не вимагає строгих температурних умов і виділяє у великих кількостях полісахарид, який відмінно знижує опір і підтримує постійне зниження опору протягом тривалого часу.

Рис. 43. Схема, що показує, як результати випробувань моделі судна в полімерному розчині можна використати для штучного відтворення коефіцієнту опору тертя і числа Рейнольдса повнорозмірного судна: 1 – число Рейнольдса моделі; 2 – лінія турбулентного тертя для води; 3 – число Рейнольдса для повнометражного судна.



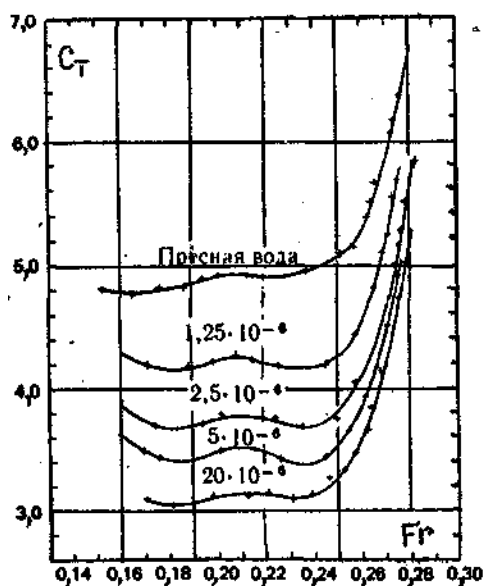
У іншому випадку при випробуванні суден автор роботи [202] використовував гуарову смолу в моделі секції каналу Св. Лаврентія для кращого опису пограничного шару на моделі корпусу судна. При використанні гуарової смоли було отримано відмінний збіг між модельними випробуваннями, теорією і натурними експериментами. Це пояснюється хорошою підбіркою масштабів пограничних шарів, отриманою при використанні розчину гуарової смоли концентрацією $2,2 \cdot 10^{-4}$ при 40%-ному зниженні опору.

Рис. 44. Результати долідів, отримані на моделі корабля довжиною 2,44 м у дослідному басейні заповненому розчином поліоксіетилену. Число Фруда розраховується за виразом;

$$Fr = v / \sqrt{gL}.$$

6.4. Зниження опору на судах

З роботи [140] відомо, що можна зменшити опір тіл обертання шляхом уприскування концентрованих розчинів полімерів з отвору до передньої частини. Розчини поліоксіетилену різної молекулярної маси вприсувалися з щілини біля передньої частини тіла діаметром 5,08 см і завдовжки 41,3 см. Виявлено істотне зменшення опору в каналі з водою; максимальне зменшення опору виходило при вприскуванні розчину поліоксіетилену концентрацією $5 \cdot 10^{-4}$.



У роботі [203] показано, що вигідно зменшувати опір зануреного тіла, чим модифікувати силову установку. Уелс [204] підтвердив ці розрахунки і показав, що якнайкраще зниження опорів виходить при випуску полімеру через пористу поверхню тіла або за допомогою покриття, що руйнується.

У роботі [205] випускали полімерні розчини з носової і інших частин моделі фрегата завдовжки 5 м. Використовуючи розчин поліоксіетилену було отримано зменшення опору тертя приблизно на 30%. Розчини полімерів випускали з точок, віддалених на 5 і 25% довжин судна від носа. Випробування проходили при $Re \leq 17 \cdot 10^4$, що відповідає швидкості судна 30 вузлів. Було виявлено, що подача 3,79 л/хв розчину поліоксіетилену концентрацій $6 \cdot 10^{-4}$ знижує опір тертя на 21%. Повний опір судна, включаючи хвилеве, зменшувався на 10%. Аналогічні результати були отримані на інших моделях суден [206, 207]. Для застосування цих методів зниження опору і потужності двигуна судна натурних розмірів необхідні дуже дешеві полімери. У роботі [208] показано, що буде потрібно декілька тонн полімеру в годину для зменшення опору судна довжиною 137 м, що рухається зі швидкістю 18 вузлів для забезпечення концентрації розчину $2 \cdot 10^{-5}$ у всьому пограничному шарі. Подальші дослідження повинні привести як до зменшення вартості полімеру, так і до поліпшення способів застосування полімерів, наприклад подача в підшар розріджених розчинів р [209].

У [210] запропоновано додавати полімер періодично, оскільки було виявлено, що зменшення турбулентності, виміряне плівковим термоанемометром, існувало в потоці на протязі 10 с після одnoseкундної ежекції полімеру.

Натурні випробування на судні завдовжки 42,7 м, прибережному мінному тральщику, описані в роботі [211]. Ежекція полімеру проводилася з двох щілин. Зазор в кожній щілині складав 0,18 мм, і вони знаходилися на обшивці корабля на відстані 1,53 и 10,7 м від носа. Поверхня корабля була дуже шорсткою. Незважаючи на шорсткість, досить погану погоду під час випробувань і нерівномірний розподіл полімеру по корпусу, повне зниження опору складало 12,7% (рис. 45), концентрація поліоксіетилену в пограничному шарі за розрахунком складала 10^{-5} , потужність силових установок, потрібної для досягнення швидкості судна 9 вузлів, знизилася на 17%. Таким чином, отримана хороша відповідність з модельними випробуваннями на фрегаті [205].

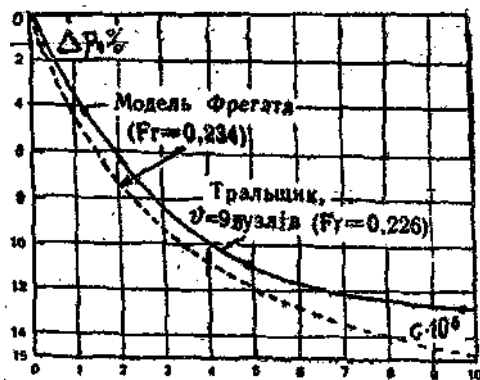


Рис. 45. Зміна загального опору на тральщику і моделі фрегату в залежності від концентрації поліоксіетилену в пограничному шарі [211].

6.5. Інші області застосувань

Експерименти показали, що опір невеликих тіл може бути зменшеним за рахунок розчинного покриття, яке кріпиться на носі і змивається під час руху у воді. У роботі [212] вказується, що опір циліндричного тіла діаметром 3,81 см і довжиною 30,48 см може бути зменшеним на 25% за допомогою дисків з розчинного полімеру, закріплених на носі.

Експериментальні дослідження роботи пожежного насоса зі шлангом показали, що перепад тиску на шланзі довжиною 213 м можна зменшити на 40%. Таким чином, при тій самій потужності насоса на 50% збільшується дальнбійність струменя і на 10% об'єм води при добавках поліоксіетилену концентрацією $2 \cdot 10^{-4}$. Цей метод прийнятий у Нью-Йорці [214...216]. Розрахунки показують, введення полімерних добавок у міський водопровід під час пожеж буде суттєво збільшувати ємність системи [217]. Крім цього, струмінь полімеру краще чинить опір руйнуванню його вітром і концентрується у меншому поперечному перерізі. Усі ці факти дуже важливі під час гасіння пожеж [218]. Дослідження Фубула [219] показують, що застосування полімерів при гасінні пожеж найбільш перспективні. Вони

можуть успішно застосовуватися в іригаційних системах, де дають подібні результати при добавці полімерів у рухомі рідини.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Freeman J.R.** Experiments Upon the Flow of Water in Pipes and Pipe Fittings, ASME, New York, 1941.– 42 p.
2. **Freeman J.R.** Experiments Relating to Hydraulics of Fire Streams, Trans., ASCE. Vol. 21, 1889.– P. 303 – 309.
3. **Lumley J.L.** Drag Reduction by Additives, in W. R. Sears, ed. Annual Review of Fluid Mechanics. Vol. 1, Annual Reviews, Inc., Palo Alto, Calif., 1969.– P. 367 – 374.
4. **Patterson G.K., Zakin J.L., Rodriguez J.M.** Drag Reduction: Polymer Solutions, Soap Solutions and Solid Particle Suspensions in Pipe Flow. Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 61, 1969.– P. 22 – 28.
5. **Toms B.A.** Some Observations on the Flow of Linear Polymer Solutions Through Straight Tubes at Large Reynolds Numbsrs, Proceedings International Congress on Rheology, Vol. II, North Holland Publishing Co., Amsterdam, 1949. P. 135 – 142.
6. **Savins J. G.** Some Comments on Pumping Reqtirements for Non-Newtonian Fluids. Journal of the Institute of Petroleum, Vol. 47, 1961. P. 329 – 334.
7. **Mysels K.J.** Flow of Thickened Fluids, U. S. Patent 2,492,173, Dec. 27, 1949.
8. **Agoston G.A., Harte W.H., Hottel H.C., Klemm W.A., Mysels K.J., Pomeroy H.H., Thompson J.M.** Flow of Gasoline Thickened by Napalm, Industrial and Engineering Chemistry. Vol. 46, 1954.– P. 1017 – 1023.
9. **Shaver R.G., Merrill, E.W.** Turbulent Flow of Pseudoplastic Polymer Solutions in Straight Cylindrical Tubes. AIChE Journal, Vol. 5, 1959.– P. 181 – 187.
10. **Dodge D.W., Metzner A.B.** Turbulent Flow of Non-Newtonian Systems. AIChE Journal, Vol. 5, 1959. P. 189 – 196.
11. **Ousterhout R.S., Hall C.D.Jr.** Reduction of Friction Loss in Fracturing Operations. Journal of Petroleum Technology. Vol. 13, 1960.– P. 217 – 223.
12. **Dever C.D., Harbour R.J., Siefert W.F.** Method of Decreasing Friction Loss in Flowing Fluids, U. S. Patent No. 3,023,760, 1962.
13. **Savins J.G.** Drag Reduction Characteristic of Solutions of Macromolecules in Turbulent Pipe Flow. Society of Petroleum Engineering Journal, Vol. 4, 1964.– P. 203 – 208.
14. **Fabula A.G., Hoyt, J.W., Crawford, H.H.** Turbulent-Flow Characteristics of Dilute Aqueous Solutions of High Polymers, Bulletin, American Physical Society, Vol. 8, 1963.– P. 477.
15. **Hoyt J.W., Fabula, A.G.** Frictional Resistance in Towing Tanks, Proceedings 10th International Towing Tank Conference, Teddington, 1963.
16. **Hoyt J.W., Fabula A.G.** The Effect of Additives on Fluid Friction, Proceedings Fifth Symposium on Naval Hydrodynamics, Bergen, Norway, Office of Naval Research ACR-112, 1964.– P. 847 – 853.
17. **Pruitt G.T., Crawford, H.R.** Drag Reduction, Rheology, and Capillary End Effects of Some Dilute Polymer Solutions, Westco Research Final Report on Contract 60530-8250. to Naval Ordnance Test Station, 1963.
18. **Hoyt J.W.** A Turbulent-Flow Rheometer, in Symposium on Rheology, Marris, A. W., Wang, J. T, S., eds., ASMR, New York, 1965.– P. 79.
19. **Hoyt J.W.** Turbulent Friction Measurement, U. S. Patent 3,327,522, 1967.
20. **Elata C., Tirosh J.** Frictional Drag Reduction, Israel Journal of Teclmology, Vol. 3, 1965.– P. 1 – 7.
21. **Elata C., Lehrer J., Kahanovita A.** Turbulent Shear Flow of Polymer Solutions. Israel Journal of Technology, Vol. 4, 1966, – P. 87 – 91.
22. **White A.** Turbulent Drag Reduction With Polymar Additives. Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 8, 1966.– P. 452 – 460.

23. **Уэллс, мл.** Аномальное турбулентное течение неньютоновских жидкостей. Ракетная техника и космонавтика, М.: Мир, № 10, 1965, – С.12 –16.
24. **Giles W.B.** Similarity Laws of Friction-Reduced Flows. Journal of Hydronautics, Vol. 2, 1968.– P. 34 – 37.
25. **Whitsitt N F., Harrington L.J., Crawford, H.R.** Effect of Wall Shear Stress on Drag Reduction of Viscoelastic Fluids. Western Co. Report No. DTMB-3 (1968). See also same authors and title in Wells O. S., ed. Viscous Drag Reduction, Plenum Press, N. Y., 1969, p. 265 – 271.
26. **Pruitt G.T., Simmons C.M., Neill G.H., Crawford H.R.** A Method to Minimize Costs of Pumping Fluids Containing Friction Reducing Additives. Soc. of Petroleum Engineers Paper No. SPE 997, 1964.
27. **Fabula A.G.** The Toms Phenomenon in the Turbulent' Flow of Very Dilute Polymer Solutions. Proceedings Fourth International Congress on Rheology, 1963, Part 3, Lee, E. H. ed., Interscience Publishers, New York, 1965.– P. 455 –460.
28. **White W.D.** Pressure-Drag Reductions in a Small Pipe-Flow Apparatus for Extremely Dilute Solutions of a High-Molecular-Weight Polymer in Water. Proceedings Fifth U. S, National Congress of Applied Mechanics, ASME, 1966.
29. **Giles W.B., Pettit W.T.** Stability of Dilute Viscoelastic Flow. Nature, Vol. 216, 1967.– P. 470 –475.
30. **Virk P.S.** The Toms Phenomenon-Turbulent Pipe Flow of Dilute Polymer Solutions. ScD thesis Massachusetts Institute of Technology, 1966.
31. **Горин, Норбери.** Турбулентное течение разбавленных водных растворов полимеров. Теоретические основы инженерных расчетов. М.: Мир, 1967, № 4.– С. 130 –136.
32. **Hoyt J.W., White, W.D.** High-Polymer Additive Effect on Turbulent Flow of Dextran, Saline Solution, and Plasma. Proceedings 19th Annual Conference on Engineering in Medicine and Biology, 1966.– P. 49 – 52.
33. **Pruitt G.T., Rosen B., Crawford H.R.** Effect of Polymer Coiling on Drag Reduction. Western Co. Report No. DTMB-2, 1966.
34. **Little R.C.** Drag Reduction by Dilute Polymer Solutions in Turbulent Flow. Naval Research Laboratory Report 6542, 1967.
35. **Metzner A.B., Park M.G.** Turbulent Flow Characteristics of Viscoelastic Fluids. Journal of Fluid Mechanics, Vol. 20, 1964.– P. 291 – 298.
36. **Metzner A.B., Reed J.C.** Flow of Non-Newtonian Fluids – Correlation of the Laminar, Transition, and Turbulent Flow Regions. AIChE Journal, Vol. 1, 1955.– P. 434 – 448.
37. **Forester R.H., Larson R.E., Hayden, J.W., Wetzel, J.M.** Effects of Polymer Addition on Friction in a 10-Inch Dia Pipe. Journal of Hydronautics, Vol. 3, 1969.– P. 59 –64.
38. **Pruitt G.T., Crawford, H R.** Effect of Molecular Weight and Segmental Constitution on the Drag Reduction of Water Soluble Polymers. Western Co. Report No. DTMB-1, 1965.
39. **Seyer F.A., Metzner A.B.** Turbulent Flow Properties of Viscoelastic Fluids. Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 45, 1967.– P. 121–124.
40. **Ripkin J.F., Pilch M.** Non-Newtonian Pipe Friction Studies with Various Dilute Polymer Water Solutions. St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory Project Report No. 71, 1964.
41. **Ripkin J.F., Pilch M.** Studies of the Reduction of Pipe Friction with the Non-Newtonian Additive CMC. St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory, Technical Paper No. 42, Series B, 1963.
42. **Kinst, W.D.** Investigation of the Turbulent Shear Flow of Dilute Aqueous CMC Solutions. AIChE Journal, Vol. 12, 1966.– P. 581 – 585.
43. **Эрнст** Турбулентное течение вязкоупругой неньютоновской жидкости. Ракетная техника и космонавтика. М.: Мир № 5, 1967.– С. 95 –97.
44. **Poreh M., Rubin, H., Elata C.** Studies in Rheology and Hydrodynamics of Dilute Polymer Solutions. Faculty of Civil Engineering Publication, No. 126, Technion, Haifa, 1969.
45. **Lummus J.L., Randall B.V.** Development of Drilling Fluid Friction Additives for Project MOHOLE. Pan American Petroleum Corp., Research Dept Report F64-P-54 Job No. 3918, 1964.

46. **Motor D. M.** Tube Flow of Non-Newtonian Polymer Solutions: Part II. Turbulent Flow. *AIChE Journal*, Vol. 10, 1964.– P. 881 –889.
47. **White A.** Flow Characteristics of Complex Soap System. *Nature*, Vol. 214, 1967.– P. 585 – 591.
48. **Horshey H. C., Zakin J. L.** Existence of Two Types of Drag Reduction in Pipe Flow of Dilute Polymer Solutions. *I&EC Fundamentals*, Vol. 6, 1967.– P. 381 – 385.
49. **Ram A., Finkelstein, E., Elata C.** Reduction of Friction in Oil Pipe-lines by Polymer Additives. *I&EC Process Design and Development*, Vol. 6, 1967.– P. 309 – 316.
50. **Pruitt G. T., Crawford, H. R.** Investigation for the Use of Additives for the Reduction of Pressure Losses. Western Co. Final Report on Contract DA-23-072-AMC-309(T), 1965.
51. **Dever C. D., Harbour R. J., Seifert, W. F.** Method of Decreasing Friction Loss in Flowing Fluids. U. S. Patent 3,023,760, 1962.
52. **Tomita Y.** A Study of Viscoelastic Fluid Flow. *Bulletin of JSME*, Vol. 9, 1966.– P. 730.
53. **Virk P. S., Merrill E. W., Mickley H. S., Smith K. A., Mollo-Christensen, E. L.** The Toms Phenomenon: Turbulent Pipe Flow of Dilute Polymer Solutions. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 30, 1967.– P. 305 –310.
54. **Вирк и др.** Предельная асимптота и структура среднего течения в явлении Томса. *Прикладная механика*, М.: Мир, № 2, 1970.– С. 238 –241.
55. **Virk P. S.** Drag Reduction in Rough Pipes. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 45, 1971.– P. 225 – 232.
56. **Gadd G. E.** Turbulence Suppression. NPL Ship Division T.M. 228, 1968.
57. **Meyer W. A.** A Correlation of the Frictional Characteristics for Turbulent Flow of Dilute Viscoelastic Non-Newtonian Fluids in Pipes. *AIChE Journal*, Vol. 12, 1966.– P. 522 – 525.
58. **Virk P. S., Merrill E. W., Mickley H. S., Smith K. A.** The Critical Wall Shear Stress for Reduction of Turbulent Drag in Pipe Flows by Poly (Ethylene Oxide) in Dilute Solution. In *Modern Development» in the Mechanics of Continua*, Academic Press Inc., N. Y., 1966.
59. **Fabula A. G., Lumley J. L., Taylor W. D.** Some Interpretations of the Toms Effect. In *Modern Development» in the Mechanics of Continua*, Academic Press, Inc., N. Y. 1966.
60. **Virk P. S., Merrill E. W.** The Onset of Dilute Polymer Solution Phenomena. In Wells, C. S., ed., *Viscous Drag Reduction*, Plenum Press, N. Y. 1969.– P. 107 –115.
61. **Cole, L. D.** NSRDC (unpublished).
62. **Vleggaar J., Dammers W. R., Tels, M.** The Diameter Effect in Drag Reduction. *Chemical Engineering Science*, Vol. 23, 1968.– P. 1159 – 1162.
63. **Уайт, Макэлигот.** Переход к турбулентности в разбавленном водном растворе смеси полимеров. *Теоретические основы инженерных расчетов*, М.: Мир, № 3, 1970.– С. 7–9.
64. **Castro W., Squire W.** The Effect of Polymer Additives on Transition in Pipe Flow. *Applied Scientific Research*, Vol. 18, 1967.– P. 81–86.
65. **Castro W. E.** The Effect of Certain Additives on Transition in Pipe Flow. PhD thesis West Virginia University, 1966.
66. **Savins J. G.** Method of Decreasing Friction Loss in Turbulent Liquids. U. S. Patent 3,361,213, 1968.
67. **Savins J. G.** A Stress-Controlled Drag-Reduction Phenomenon. *Rheologica Acta*, Vol. 6, 1967.– P. 323 – 331.
68. **Savins J. G.** Contrasts in the Solution Drag Characteristics of Polymeric Solutions and Micellar Systems. In Wells, C. S., ed., *Viscous Drag Reduction*, Plenum Press, N. Y., 1969, p. 183.
69. **White, A.** Some Observations on the Flow Characteristics of Certain Dilute Macromolecular Solutions. In Wells, C. S., ed., *Viscous Drag Reduction*, Plenum Press, N. Y., 1969, p. 297.
70. **Radin I., Zakin, J. L., Patterson G. K.** Exploratory Drag Reduction Studies in Non-Polar Soap Systems. In Wells, C. S., ed., *Viscous Drag Reduction*, Plenum Press, N. Y., 1969.– P. 213.
71. **Rodriguez F.** Drag deduction by a Polymeric Aluminum. Soap. *Nature Physical Science*, Vol. 230, 1971, p. 152.

72. **Baker H.R., Bolster R.N. Leach, P.B., Little, R.C.** Association Colloids in Nonaqueous Fluids—Viscosity and Drag Reduction Characteristics. I&EC, Prod. Research & Development, Vol. 9, 1970.— P. 541 – 547.
73. **Lindgren E.R., Hoot T.G.** Effects of Dilute High Molecular Weight Polymers on Turbulent Flows of Water in Very Rough Pipes. Journal of Applied Mechanics», Vol. 35, Trans. ASME, Vol. 90, Series E, No. 2, June 1968.— P. 417– 421.
74. **White A.** Studies of the Flow Characteristics of Dilute High Polymer Solutions. Hendon College of Technology Research Bulletin No. S, 1968.— P. 113 –118.
75. **White, A.** Turbulence and Drag Reduction with Polymer Additives. Hendon College of Technology Research Bulletin No. 4, 1967, p. 75.
76. **Spangler, J.G.** Studies of Viscous Drag deduction with Polymers Including Turbulence Measurements and Roughness Effects. Wells, C. S., ed., Viscous Drag Reduction, Plenum Press, N.Y., 1969.— P. 131 – 133.
77. **Brandt H., McDonald, A.T., Boyle F.W.** Turbulent Skin Friction of Dilute Polymer Solutions in Rough Pipes In Wells, C S., ed., Viscous Drag Reduction, Plenum Press, N. Y., 1969.— P. 159 – 164.
78. **McNally W.A.** Heat and Momentum Transport in Dilute Poly (Ethylene Oxide) Solutions. Naval Underwater Weapons Research and Engineering Station TR 44, 1968. Also sea PhD thesis, University of Rhode Island, 1968.
79. **Баренблатт Г.И., Городцов В.А., Калашников В.Н.** Турбулентность аномальных жидкостей. Тепло- и массоперенос, том III, Тепло- и массоперенос в реологических системах, Институт тепло- и массообмена АН БССР, Наука и техн., Минск: 1968. С. 3—23.
80. **Poreh M.** Flow of Dilute Polymer Solutions in Rough Pipes Journal of Hydraulics, Vol. 4, 1970, p. 151.
81. **Bogue D.C, Metzner A.B.** Velocity Profiles in Turbulent Pipe Flow, Newtonian and Non-Newtonian Fluids, I&EC Fundamentals, Vol. 2, 1963.— P. 143 – 151.
82. **Nicodemo L., Acierno D., Astarita, G.** Velocity Profiles in Turbulent Pipe Flow of Drag-Reducing Liquids. Chemical Engineering Science, Vol. 24, 1969.— P. 1241 – 1253.
83. **Giles W.B.** Similarity Laws of Friction-Reduction Flows. Journal of Hydraulics, Vol. 2, 1968.— P. 34 – 37.
84. **Kozicki W., Tiu C.** Anomalous Wall Effects and Associated Drag Reduction in Turbulent Flow. Chemical Engineering Science, Vol. 23, 1968.— P. 231– 238.
85. **Squire W., Castro W., Costrell J.** Mechanism of Turbulent Friction Reduction in Pipes by Dissolved Additives. Nature, Vol. 213, 1967.— P. 1008 – 1016.
86. **Nadolink R.H.** Determination of Turbulent Velocity Distributions with Non-Newtonian Additives Using High-Speed Photo-microscopy. MS thesis, University of Massachusetts, 1968.
87. **Rudd M.J.** Measurements made on a Drag Reducing Solution With a Laser Velocimeter. Nature, Vol. 224, 1969.— P. 687 –691.
88. **VanDriest E.R.** Turbulent Drag Reduction of Polymeric Solutions. Journal of Hydraulics, Vol. 4, 1970.— P. 120–124.
89. **Virk P.S.** An Elastic Sublayer Model for Drag Reduction by Dilute Solutions of Linear Macromolecules," Journal of Fluid Mechanics, Vol. 45, 1971.— P. 417 – 423.
90. **Astarita G., Nicodemo L.** Velocity Distributions and Normal Stresses in Viscoelastic Turbulent Pipe Flow. AIChE Journal, Vol. 12, 1966.— P. 478 – 483.
91. **Metzner A.B., Astarita G.** External Flow of Viscoelastic Materials: Fluid Property Restrictions on the Use of Velocity-Sensitive Probes. AIChE Journal, Vol. 13, 1967.— P. 550 – 556.
92. **Smith K.A., Merrill E.W., Mickley H.S., Virk P.S.** Anomalous Pitot Tube and Hot Film Measurements in Dilute Polymer Solutions. Chemical Engineering Science, Vol. 22, 1967.— P. 619 – 626.
93. **Patterson G.K., Florez, G.L.** Velocity Profiles During Drag Reduction. In Wells, C. S., ed., Viscous Drag Reduction, Plenum Press, N. Y., 1969.— P. 233 –241.

94. **Wetzel J.M., Tsai, F.Y.** Impact Tube Measurements in Dilute Polymer Solutions. *AIChE Journal*, Vol. 14, 1968.– P. 663 – 667.
95. **Friehe C.A., Schwartz W.H.** The Use of Pitot Static Tubes and Hot-Film Anemometers in Dilute Polymer Solutions. In Wells, C. S., ed., *Viscous Drag Reduction*, Plenum press, N. Y., 1969.– P. 281 – 289.
96. **Fruman D., Sulmont, P., Lojseau, G.** Measure des vitesses dans les fluides viscoélastiques au moyen de tubes de Pitot. *Journal de Mécanique*, Vol. 8, 1969.– P. 463 – 469.
97. **Lindgren E.R., Chao J.L.** Application of the Hot Film Technique on Flow of High-Polymer Solutions. *Physics of Fluids*, Vol. 10, 1967.– P. 667– 672.
98. **Fabula A.G.** Operating Characteristics of Some Hot Film Velocity Sensors in Water. In *Advances in Hot-Wire Anemometry*. Melnik W.L., Weske J.R., eds. *Proceedings Inter. Symp. on Hot-Wire Anemometry*, 1967.
99. **Уэллс мл. и др.** Измерение турбулентности при течении в трубе неньютоновской жидкости, вызывающей снижение сопротивления. *Ракетная техника и космонавтика*, М.: Мир № 2, 1968. С. 70 – 77.
100. **Seyer F.A., Metzner A.B.** Turbulence Phenomena in Drag Reducing-Systems. *AIChE Journal*, Vol. 15, 1969.– P. 426 – 432.
101. **Goldstein R.J., Adrian J. J., Kreid D.K.** Turbulent and Transition Pipe Flow of Dilute Aqueous Polymer Solutions. *I&EC Fundamentals*, Vol. 8, 1969.– P. 498 – 502.
102. **Chung J.S., Graebel W.P.** Laser Anemometer Measurements of Turbulence in Non-Newtonian Pipe Flows. University of Michigan, College of Engineering Technical Report, ONR Contract No. NOM-224(49), 1969.
103. **Gadd G.E.** Effects of Drag-Reducing Additives on Vortex Stretching. *Nature*, Vol 317, 1968.– P. 1040 – 1045.
104. **White W. D.** Drag-Reduction Measurements for Three Polymers at 4°C. Wells, C S., ed., *Viscous Drag Reduction*, Plenum Press, N. Y. 1969.– P. 173 –181.
105. **Билген.** Устойчивость трехмерного пограничного слоя разбавленных полимерных растворов. Теоретические основы инженерных расчетов, М.: Мир, № 1, 1971. С. 85 –91.
106. **Gadd G. E.** The Effect on the Turbulent Boundary Layer of Adding Guar Gum to the Water in Which a Disk Rotates. *National Physical Laboratory, Ship T. M.* 42, 1963.
107. **Gilbert C.G., Ripken J.F.** Drag Reduction on a Rotating Disk. In Wells, C. S., ed., *Viscous Drag Reduction*, Plenum Press, N.Y., 1969.– P. 251 – 257.
108. **Smallman J.R., Wade J.H.T.** The Influence on Hydrodynamic Drag of High Molecular Weight Compounds. *Canadian Aero-Space Institute Transactions*, Vol. 2, 1969.– P. 37– 43.
109. **Miloh T.** Boundary Layer on a Disk Rotating in Dilute Polymer Solution. MSc thesis, Technion, Israel Institute of Technology, 1969.
110. **Amfilokhiev W R., Ferguson A.M.** The Change of Frictional Drag with Surface Roughness in Dilute Polymer Solutions. *Proceedings of the 11th International Towing Tank Conference*, Rome, 1969.
111. Whiteitt N. F., and Crawford, H. R., "Frictional Drag Loss Characteristics of Enclosed Rotating Disks Operating in a Viscoelastic Fluid Media," The Western Co, Report on Contract No. N60530-12741, 1967.
112. **Whitsitt N.F., Moon G M.** Evaluation of the Enclosed Rotating Disk Drag Reduction Characteristics of Silicone, and Hydrocarbon Based Viscoelastic Solutions. Western Co. Report on Contract No. N60530-12741, 1967.
113. **Poreh, M., Miloh, T.** Rotation of a Disk in Dilute Polymer Solutions. *Journal of Hydraulics*, Vol. 5, 1971.– P. 61 – 64.
114. **Goldstein S.** On the Resistance to the Rotation of a Disc Immersed in a Fluid. *Proceedings of the Cambridge Philosophy Society*, Vol. 31, 1935.– P. 232 – 237.
115. **Rubin, H., Elata C.** Stability of Couette Flow of Dilute Polymer Solutions. *Physics of Fluids*, Vol. 9, 1966.– P. 1929 – 1935.

116. **Jones W.M., Marshall D.E.** Relaxation Effects in Couette Flow between Rotating Cylinders. *British Journal of Applied Physics*, Vol. 2, 1969.– P. 809 – 816.
117. **Denn M.M., Roisman J.J.** Rotational Stability and Measurement of Normal Stress Functions in Dilute Polymer Solutions. *AIChE Journal*, Vol. 15, 1969.– P. 454 – 460.
118. **Merrill E.W., Mickley H S., Ram A.** Instability in Couette Flow of Solutions of Macromolecules. *Journal of Fluid Mechanics*, V. 1, No 13, 1962.– P. 86.
119. **Song C.S., Tsai, F.Y.** Experimental Investigation of Taylor Instability Using Non-Newtonian Fluids. St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory Project Report No. 84, 1966.
120. **Shin H.** Reduction of Drag in Turbulence by Dilute Polymer Solutions. ScD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1965.
121. **Killen J.M., Almo J.** Experimental Study of the Effects of Dilute Solutions of Polymer Additives on Boundary Layer Characteristics. Wells. C. S., ed.. *Viscous Drag Reduction*, Plenum Press, N. Y., 1969.– P. 447 –151.
122. **Belokon V.S., Kalashnikov V.N.** Polymer Additives and Turbulent Friction Near Rough Surfaces. *Nature Physical Science*, Vol. 229, 1971.– P. 55 –61.
123. **Granville P.S.** The Frictional Resistance and Velocity Similarity Laws of Drag-Reducing Dilute Polymer Solutions. NSRDC Report 2502, 1967.
124. **Granville P.S.** Limiting Conditions to Similarity-Law Correlations for Drag-Reducing Polymer Solutions. NSRDC Report 3635, 1971.
125. **Elata C.** Reduction of Friction on Submerged Bodies by Polymer Additives. *Proceedings of the 11th International Towing Tank Conference, Tokyo, 1966.– P. 81 – 88.*
126. **White D.A.** The Flow of a Dilute Polymer Solution in a Turbulent Boundary Layer on a Flat Plate. In Wells, C. S., ed., *Viscous Drag Reduction*, Plenum Press, N. Y., 1969.– P. 351 – 354.
127. **Artjushkov L.S.** Some Problems of Non-Newtonian Fluids Hydrodynamics. University of Glasgow, Dept. of Naval Architecture Experiment Tank, Report No. 13, 2 Vols., 1970.
128. **Granville P.** Maximum Drag Reduction at High Reynolds Number for a Flat Plate Immersed in Polymer Solution. NSRDC, Ship Performance Department, Technical Note 205, Aug. 1971.
129. **Poreh M.** Drag Reduction of Flat Plates with Surface Roughness. Naval Undersea Research and Development Center TP 222, 1971.
130. **Emerson A.** Model Experiments Using Dilute Polymer Solutions. Instead of Water. *Trans., N.E. Coast Inst. of Engineers and Shipbuilders*, Vol. 81, 1965.– P. 201 – 205.
131. **Love R. H.** The Effect of Ejected Polymer Solutions on the Resistance and Wake of a Flat Plate in a Water Flow, Hydronautics Inc. Tech. Report 353-2, 1965.
132. **Levy J., Davis S.** Drag Measurements on a Thin Plate in Dilute Polymer Solutions. *International Shipbuilding Engineers*, Vol. 14, 1967.– P. 166 – 172.
133. **White F.M.** An Analysis of Flat Plate Drag With Polymer Additives. *Journal of Hydronautics*, Vol. 2, 1968.– P. 181 – 187.
134. **Fruma D., Hitlmont P.** Reduction de la rfoUtance de frottement d'une plaque plane dans les solutiurs de polymftres. *C. R, Acad. Sc. Paris*, Vol. 268, Series A, 1069.– P. 1493 – 1501.
135. **Kilian F.-P.** Vflrfahren sur Widerntandsvermiixierung-l, *Fortschrittsbericht. Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau. Bericht Nr. 384/67*, 1967.
136. **Tagori T., Alhidate I.** Some Experiments on Friction Reduction on Flat Plate by Polymer Solutions. *Proceeding lgth International Towing Tank Conference, Rome, 1960.*
137. **Kim S., Tagori, T.** Drag Measurements on Flit Plates with Uniform Injection of Polymer Solutions and their Direct Application to the Wall. *Proceeding Annual Meeting JSME*, Oct. 1969.
138. **Granville P.S.** Drag Reduction of Flat Plates with Slot Ejection of Polymer Solution. NSRDC, Report 3158, 1969.
139. **Wu J., Tulin, M.** Drag Reduction by Ejecting Additive Solutions into a Pure-Water Boundary Layer. *Hydronautics, Inc. Tech. Report 353-7*, 1970.

140. **Vogel W.M., Patterson A.M.** An Experimental Investigation of the Effects of Additives Injected Into the Boundary Layer of an Underwater Body. Proceedings 6th Symposium on Naval Hydrodynamics, Bergen, ONR-ACR-112, 1964.– P. 975 –982.
141. **Doherty B.J.** Investigation of drag Reduction Obtained Through Boundary Layer Injection of Dilute Solutions of Poly-(Ethylene Oxide). U. S. Naval Academy, Trident Scholar Report, 1965.
142. **Baronnet C.N., Hoppman W. H. H.** Drag Reduction Caused by High Polymer Solutions Inject into Water Flowing Around Cylindrical Bodies. Rensselaer Polytechnic Inst., Dept. of Mechanics, Report to ONR on Contract No 59-(20), 1966.
143. **Walsh M., III.** On the Turbulent flow of Dilute Polymer Solutions. PhD thesis, California Institute of Technology, 1967.
144. **Lumley J. L.** Turbulence in Non-Newtonian Fluids, Physics of Fluids, Vol. 7, 1961.– P. 335 – 340.
145. **Elperin I.T., Smolskii, B.M., Leventhal L.I.** Decreasing the Hydrodynamic Resistance of Pipelines. International Chemical Engineering, Vol. 7, 1967, – P. 276 – 280.
146. **Davies G.A., Ponter A.B.** Turbulent Flow Properties of Dilute Polymer Solutions. *Nature*, Vol. 212, 1966.– P. 66 – 70.
147. **Little R.C.** Displacement of Aqueous Drag-Reducing Polymer Solutions. I&EC Fundamentals, Vol. 8, 1969.– P. 520 –529.
148. **Peyser P., Little, R.C., Singleberry C. R.** A Study of Drag Reduction and Absorption of Polymer Solutions. Naval Research Lab. Report 7222, 1971.
149. **Elata C., Poreh M.** Momentum Transfer in Turbulent Shear Flow of an Elastico-Viscous Fluid. *Rheologica Acta*, Vol. 5, 1966.– P. 148 – 151.
150. **Gadd G.** Differences in Normal Stress in Aqueous Solutions of Turbulent Drag Reducing Additives. *Nature*, Vol. 212, 1966.– P. 1348 –1351.
151. **Patterson G. K., Zakin J.L.** Prediction of Drag Reduction with a Viscoelastic Model. *AIChE Journal*, Vol. 14, 1968.– P. 434 – 439.
152. **Kinnier J.W., Reister W.A.** Investigation of Low Frequency Dynamic Viscoelastic Properties of Aqueous Poly(Ethylene Oxide) Solutions. MS thesis, U. S Naval Postgraduate School, Monterey, 1965.
153. **Prather R.J.** Investigations of the Ultrasonic Dynamic Viscoelastic Properties of Aqueous Poly(Ethylene Oxide) Solutions. MS thesis, U. S, Naval Postgraduate School, Monterey, 1966.
154. **Boggs F.W., Thompson J.** Flow Properties of Dilute Solutions of Polymers, Part 1– Mechanism of Drag Reduction. U. S. Rubber Co. Research Center Report on Contract No Nonr-3123(00), 1966.
155. **Boggs F.W., Thompson J.** Flow Properties of Dilute Solutions of Polymers, Part III – Effect of Solute on Turbulent Field. U. S. Rubber Co. Research Center Report on Contract Nos. Nonr 3120(00) and N00014-66-C0322, 1967.
156. **Lockett F.J.** Fluid Dynamics Approach to the Toms Effect. *Nature*, Vol. 222, 1969.– P. 937 – 946.
157. **Black T.J.** Viscous Drag Reduction Examined in the Light of a New Model of Wall Turbulence. In Wells, C. S., ed. *Viscous Drag Reduction*, Plenum Press. N.Y. 1969.– P. 883 – 892.
158. **Tulin M.P.** Hydrodynamic Aspects of Macromolecular Solutions. Proceedings 6th Symposium on Naval Hydrodynamics Washington, ONR ACR-136, 1966.– P. 3 – 10.
159. **Ламли Дж.Л.** Эффект Томса: аномальные явления при турбулентном течении разбавленных растворов линейных высокомолекулярных полимеров. Сб. переводов «Механика», № 2, 1969.– С.70 – 89.
160. **Cottrell F. R.** An Experimental Study of the Conformation of Polyisobutylene in a Hydrodynamic Shear Field. ScD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1968.

161. **Cottrell F.R., Merrill E.W., Smith, K.A.** Conformation of Polyisobutylene in Dilute Solution Subjected to a Hydrodynamic Shear Field. *Journal of Polymer Science, Series A-2*, Vol. 7, 1969.– P. 1417 –1423.
162. **Cottrell F.R., Merrill E.W., Smith K.A.** Intrinsic Viscosity and Axial Extension Ratio of Random-Coiling Macromolecules in a Hydrodynamic Shear Field. *Journal of Polymer Science, Series A-2*, Vol. 8, 1970.– P. 287 – 295.
163. **Paterson R.W.** Turbulent Flow Drag Reduction and Degradation with Dilute Polymer Solutions. Harvard University, Division of Engineering and Applied Physics Report to ONR, Contract N00014-67-7-0298-0002, 1969. See also *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 43, 1970.– P. 689.
164. **Little R.C.** Flow Properties of Polyox Solutions. *I&EC Fundamentals*, Vol. 8, 1969.– P. 557 – 565.
165. **Kinnier J.W.** A Correlation Between Friction Reduction and Molecular Size for the Flow of Dilute Aqueous Poly(Ethylene Oxide) Solutions in Pipes. PhD thesis, U. S. Naval Postgraduate School, 1970.
166. **Ellis A.T., Ting R.V., Nadolink R. H.** Some Effects of Storage and Shear History on the Friction Reducing Properties of Dilute Polymer Solutions. AIAA Paper 70-532, 1970.
167. **Pfenninger W.** A Hypothesis of the Reduction of the Turbulent Friction Drag in Fluid Flows by Means of Additives, etc. Northrop Corp. Norair Division Report BLC-179, 1967.
168. **Peterlin A.** Molecular Model of Drag Reduction by Polymer Solutes. *Nature*, Vol. 227, 1970.– P. 598 – 604.
169. **Gordon R.J.** Mechanism for Turbulent Drag Reduction in Dilute Polymer Solutions. *Nature*, Vol. 227, 1970.– P. 599 – 604.
170. **Gordon R.J.** On the Explanation and Correlations of Turbulent Drag Reduction in Dilute Macromolecular Solutions. *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 14, 1970. – P. 2097.
171. **Latto B., Shen C.H.** Effect of Dilute Polymer Solution Injection on External Boundary Layer Phenomena. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 48, 1970.– P. 34 – 37.
172. **Astarita G.** Possible Interpretation of the Mechanism of Drag Reduction in Viscoelastic Liquids. *I&EC Fundamentals*, Vol. 4, 1965.– P. 354 – 361.
173. **Gadd G E.** Reduction of Turbulent Friction in Liquids by Dissolved Additives. *Nature*, Vol. 212, 1966.– P. 874 –880.
174. **Gadd G.E.** Turbulence Damping and Drag Reduction Produced by Certain Additives in Water. *Nature*, Vol. 206, 1965.– P. 463 – 469.
175. **Johnson B., Barchi R.H.** Effect of Drag-Reducing Additives on Boundary-Layer Turbulence. *Journal of Hydronautics*, Vol. 2, 1968. p. 108.
176. **Walsh M.** Theory of Drag Reduction in Dilute High-Polymer Flows. *International Shipbuilding Progress*, Vol. 14, 1967.– P. 134 – 136.
177. **Walters R.R., Wells C. S.** An Experimental Study of Turbulent Diffusion of Drag Reducing Polymer Additives. *Journal of Hydronautics*, Vol. 5, 1971.– P. 65 – 70.
178. **Kilian F.-P.** Über die Verminderung des Reibungswertes von Grenzschichtströmungen viskoelastischer Flüssigkeiten. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau*, Berlin, Heft 51 and 52, 1970.
179. **Gyr A.** Analogy between Vortex Stretching by Drag-Reducing Additives and Vortex Stretching by Fine Suspensions. *Nature*, Vol. 219, 1968.– P. 928 – 934.
180. **Metzner A.B., Metzner A.P.** Stress Levels in Rapid Extensional Flows of Polymeric Fluids. *Rheologica Acta*, Vol. 9, 1970.– P. 174 – 178.
181. **Brennen C., Gadd G. E.** Aging and Degradation in Dilute Polymer Solutions. *Nature*, Vol. 215, 1967.– P. 1368 – 1375.
182. **Fabula A.G.** An Experimental Study of Grid Turbulence in Dilute High-Polymer Solutions. *Proceedings of the 6th Symposium on Naval Hydrodynamics*, Washington ONR-ACR-136, 1966.– P. 39 – 43.
183. **Vlasov S. A., Kalashnikov V.N.** Turbulent Diffusion of Heat in Jets of Dilute Polymer Solutions, *Nature*, Vol. 224, 1969.– P. 1195 – 1204.

184. **Bobkowitz A.J., Gauvin W.H.** Turbulent Flow Characteristics of Model Fiber Suspension. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 43, 1965.— P. 87 – 91.
185. **Boggs F.W.** Relationship Between Flow Pattern, Constitutive Equation and Molecular Structures. In Wells C.S. ed., *Viscous Drag Reduction*, Plenum Press, N. Y., 1969.— P. 475 – 485.
186. **Melton L.L., Malone W.T.** Fluid Mechanics Research and Engineering Application in Non-Newtonian Fluid Systems. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1964.— P. 56 – 61.
187. **Wells C S. Jr., Spangler J.G.** Injection of a Drag-Reducing Fluid into Turbulent Pipe Flow of a Newtonian Fluid. *Physics of Fluids*, Vol. 10, 1967.— P. 1890 – 1897.
188. **Maus J.R., Wilhetra L.R.** Effect of Polymer Injection on Frictional Drag in Turbulent .Pipe Flow. *Journal of Hydronautics*. Vol. 4, 1970.— P. 35 – 43.
189. **Wu J.** Some Techniques of Ejecting Additive Solutions for Drag Reduction. *Hydronautics, Inc. Technical Report 7101-1*, 1971.
190. **Seyer F.A., Metzner A.B.** Drag Reduction in Large Tubes and the Behavior of Annular Films of Drag Reducing Fluids. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 47, 1969.— P. 525 – 529.
191. **Giles W.B.** Projected Friction Reduction and Velocity Profiles in Large Diameter Pipes. *General Electric Research and Development Center, Report No. 70-C-276*, 1969.
192. **Western Co.** Polymers for Sewer Flow Controls. *Federal Water Pollution Control Adm. Report WP-20-22*, 1969.
193. **Treiber K.L., Sieracki L.M.** The Effect of Non-Newtonian Friction Reducing Additives in a Diesel Fuel Pipeline. *Columbia Research Corp., Report No 101-2*, 1970.
194. **Lescarboursa J.A., Culter J.D., Wahl H.A.** Drag Reduction with a Polymeric Additive in Crude Oil Pipelines. *Soc. Pet. Engrs., Preprint SPE 3087*, 1970,
195. **Poreh M., Zakin J.L., Brosh A., Warahaveky M.** Drag Reduction in Hydraulic Transport of Solids. *Proceedings of the ASCE, Journal of the Hydraulics Division*, Vol. 96, No 4, 1970.— P. 903 – 910.
196. **Fowkes R.S., Wancheck G.A.** Materials Handling Research: Hydraulic Transportation of Coarse Solids. U. 8, *Bureau of Mines Report of Investigations 7283*, 1969.
197. **Hoyt J.W.** Friction Reduction as an Estimator of Molecular Weight. *Polymer Letters*, Vol. 4, 1966.— P. 713 – 721.
198. **Hoyt J.W.** Turbulent-Flow Properties of Deoxyribonucleic Acid Solutions. *Nature*, Vol. 211, 1966.— P. 170 –178.
199. **Kenis P.R.** Drag Reduction by Bacterial Metabolites. *Nature*, Vol. 217, 1968.— P. 940 – 946.
200. **Kowalski T.** Reduction of Frictional Drag by Non-Newtonian Additives. *Naval Engineers Journal*, Apr. 1966.— P. 293 – 297.
201. **Hoyt J.W.** The Use of Periphyridium aeruginosum as a Scaling Aid in Towing Tanks. *Proceedings of the 11th International Towing Tank Conference*, Tokyo, 1966.
202. **Tothill J.T.** Ships in Restricted Channels—A Correlation of Model Tests, Field Measurements, and Theory. *Marine Technology*, Vol. 4, 1967.— P. 111 –115.
203. **Lang T.G.** The Effect of Drag Reduction and Other Improvements on the Design and Performance of Submerged Vehicles. In Wells, C. S., ed., *Viscous Drag Reduction*, Plenum Press, N.Y., 1969.— P. 313 –316.
204. **Wells C.S.** An Analysis of Uniform Injection of a Drag-Reducing Fluid into a Turbulent Boundary Layer. In Wells, C. S., ed., *Viscous Drag Reduction*, Plenum Press, N. Y., 1969.— P. 361 – 370.
205. **Dove H.L.** The Effect on Resistance of Polymer Additives Injected into a Boundary Layer of a Frigate Model. *Proceedings 11th International Towing Tank Conference*, Tokyo, 1966.
206. **Gollan A., Tulin, M.P., Rudy, S.L.** Development and Model Tests of a Surface Ship Additive System. *Hydronautics, Inc. Technical Report 909-1, Final*, 1970.
207. **Oltmann P.** Versuche zur Verrainderung des Reibungswiderstandes von Schiffsmoellen. *Schiff und Hafen*, Vol. 21, Heft 6, 1969.— P. 3 – 10.

208. **Kowalski T.** Higher Ship Speeds Due to Injection of Non-Newtonian Additives. Dept. of Mech. Eogr., University of Waterloo. Paper presented to Eastern Canadian Section, SNAME, Jan. 1968.
209. **Wu J.** Drag Reduction in External Flows of Additive Solutions. In Wells, C. S., ed. *Viscous Drag Reduction*, Plenum Press, N.Y., 1969.— P. 331 – 334.
210. **Kowalski T.** Turbulence Suppression and Viscous Drag Reduction by Non-Newtonian Additives. Trans. RINA, Vol. 110, 1968.— P. 207 – 214.
211. **Canham H.J.S., Catchpole J. P., Long R.F.** Boundary Layer Additives to Reduce Ship Resistance. The Naval Architect, J. Rina, No. 2, July 1971.— P. 187 – 190.
212. **Thurston S., Jones R.D.** Experimental Model Studies of Non-Newtonian Soluble Coatings for Drag Reduction. AIAA Journal of Aircraft, Mar.-Apr. 1965.
213. **Anon.** Friction Reducing Agent Improves Water Flow. Chemical Engineering, Aug. 1966.— P. 36 – 46.
214. **Scott D.** Slippery Water in Fire Hoses. Science, Vol. 164, 1969.— P. 1468 – 1474.
215. **Anon.** Slippery Water Cuts Friction Loss. Fire Engineering, Sept. 1969.— P. 48 – 55.
216. **Anon.** Rapid Water-Friction Nemesis. Fire Engineering, Jan. 1971.— P. 33 – 37.
217. **Jackson H.C., Mayer P.G.** Unsteady Flow of Dilute Aqueous Polymer Solutions in Pipe Networks—A Method to Improve Water Distribution. Georgia Institute of Technology, Water Resources Center, Report WRC 0170, 1970.
218. **Green J.H.** Effect of Polymer Additives on Nozzle Coherence: A Preliminary Study. Naval Undersea R&D Center TN 504, 1971.
219. **Фэбула.** Использование снижения сопротивления при течении растворов полимеров в противопожарной технике. Теор. основы инж. расч, М.: Мир, №3, 1971.—С. 109 – 115.
220. **Хабахпашаев Е.М., Перепелица Б.В.** Об особенностях пристенной турбулентности в потоках воды с высокомолекулярными добавками. ИФЖ, Т.18, №6, 1970.— С. 1094 – 1097.
221. **Никитин И.К., Поздня Н.Г., Дзевалтовский А.В.** Профиль скорости и сопротивление трения в турбулентном пристенном течении разбавленных полимерных растворов. Гидромеханика. Межведомственный республиканский сборник АН УССР, вып. 19, 1971.— С. 93 – 98.