

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ АНОМАЛЬНИХ РІДИН

Описано властивості неньютонівських рідин і спостережувані в них ефекти. Застосування їх для розв'язку турнірних задач.

Ключові слова: аномальна рідина, в'язкість, ефект Вайсенберга, ефект Кея.

Dejneka V. V. The study of anomalous properties of liquids

The properties of nonnewton liquids and the effects observed in them are described.

Utilization of nonnewton liquids for solving tournament problems.

Keywords: abnormal liquid, viscosity, Weissenberg effect, Kay effect.

В природі існують рідини, поведінку яких не можливо описати звичними для нас законами Ньютона. Для них крива течії не є лінійною. Такі рідини іменують неньютонівськими або аномальними.

Дослідами встановлено, що рух неньютонівських рідин починається тільки після того, як дотичні напруження досягнуть деякого граничного мінімального значення (так звана початкова напруга зрушення); при менших напругах вони не течуть, а відчувають тільки пружні деформації. В аномальних рідинах

дотичне напруження визначають за формулою Бінгема: $\tau = \tau_0 + \mu \frac{du}{dy}$.

Таким чином, в аномальних рідинах сила тертя виникає ще в стані спокою, але при прагненні їх почати рухатися.

Для ньютонівських рідин $f(\tau) = \frac{\tau}{\mu}$, а для неньютонівських — функція $f(\tau)$ може мати різний вигляд залежно від роду рідини.

Наприклад, якщо $f(\tau) = \frac{\tau - \tau_0}{\eta}$, де τ_0 — граничне напруження зсуву, а η — пластична в'язкість, то рідина являє собою бінгамовський пластик. Коли ж $f(\tau) = \frac{\tau^{1/n}}{k}$, де n і k — сталі для даної рідини, то при $n < 1$ маємо так звану псевдопластичну рідину, а

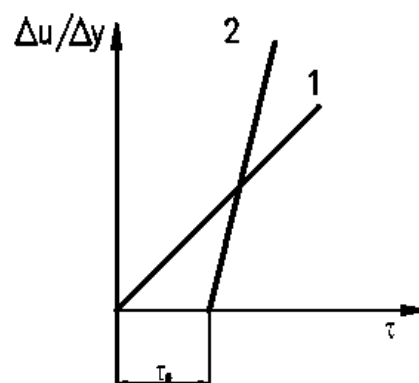


Рис.1. – Залежність дотичного напруження від градієнта (1- нормальна рідина, 2-аномальна рідина)

при $n > 1$ — дилатантну рідину. Стала n характеризує ступінь неньютонівської поведінки матеріалу, а k — міру консистенції рідини.

Рух аномальних рідин якісно дуже відрізняється від руху ньютонівських. Так, наприклад, розглянемо деякі ефекти, які виникають при цьому.

Рух, який створюється стержнем, що обертається. Відмінність проявляється в тому, що поверхня ньютонівської рідини поблизу стержня опускається, в той час як аномальна рідина намагається піднятися по ньому. Це є відомий ефект Вайсенберга. Технічно, це полягає в наступному: якщо в ємність з розчином полімерів помістити обертовий стрижень, то навколо нього рівень рідини почне підвищуватися, розчин буде «намотуватися». Ланцюжки полімерів закручуються навколо стрижня, а вільні кінці в основній масі розчину виявляються поплутаними. Під час обертання кінець ланцюжка загорнутий на стрижні і знаходиться під натягом (сила натягу діє на кожен кінець). При спробі зменшення відстані між двома кінцями полімер намагається зміщуватися вгору або вниз по стрижні до області, де стрижень менше обмотаний полімерним ланцюжком, де ефективний діаметр (діаметр стрижня плюс накручений ланцюжок навколо) менший, а відстань, відповідно, коротша.

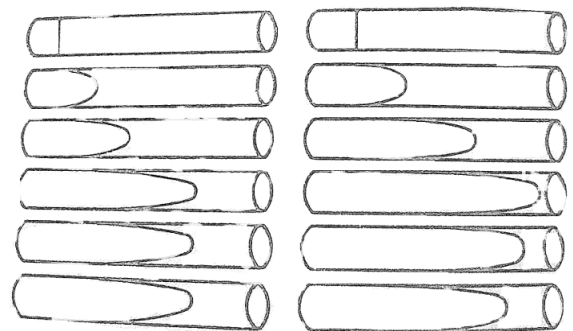


Рис. 2

Обертання диска на дні посудини приводить до руху, при якому в ньютонівській рідині поверхня в центрі опускається, а в неньютонівській — піднімається.

На *рис.2*. показано як веде себе рідина, яку прокачують по круглій трубі. Ми слідкуємо за течією, спостерігаючи за міткою фарби, нанесеної перед початком руху. На рисунку показано шість послідовних положень мітки. При виключенні насоса в четвертому положенні ньютонівська рідина приходить у стан спокою.

На відміну від цього неньютонівська рідина проявляє ефект «віддачі», як це видно з п'ятого і шостого положення мітки. В цьому досліді виявляється «пам'ять» полімерної рідини. Оскільки мітка не приходить все ж таки в своє початкове положення (як резинка після розтягу), можна сказати, що неньютонівська рідина володіє ефектом «затухаючої пам'яті».

При витіканні із трубки чи щілини неньютонівська рідина «розбухає». Площа поперечного перерізу при цьому може вирости в п'ять разів.

На *рис.3.* подана схема експерименту з сифоном. В ньютонівській рідині сифон діє лише тоді, коли його засмоктуючий кінець знаходиться нижче поверхні рідини. Але не ньютонівську рідину можна викачати з посудини, навіть якщо відстань між поверхнею рідини і кінцем сифона складає кілька сантиметрів.

На *рис.4.* показано, що відбувається, коли рідина тече по нахиленому жолобу напівкруглого перерізу. В обох випадках течія ламінарна. Поверхня ньютонівської рідини плоска, за виключенням ділянок біля країв, в той час як поверхня неньютонівської рідини злегка опукла.

Повільний рух рідини при переході з широкої труби в вузьку. В неньютонівській рідині створюються вихори вверх за течією, в результаті чого частина рідини захоплюється цими вихорями і не проникає у вузьку трубу.

На *рис.5.* показано, що відбувається, коли в трубку, наповнену рідиною, кидають одну за одною дві кульки. В ньютонівській рідині друга кулька буде доганяти першу і в кінці-кінців зіткнеться з нею. В неньютонівській рідині теж саме відбудеться лиш тоді, коли друга кулька кинута відразу за першою. Але якщо почекати трішки довше, ніж певний критичний інтервал часу, то при падінні друга кулька буде відштовхуватися від першої.

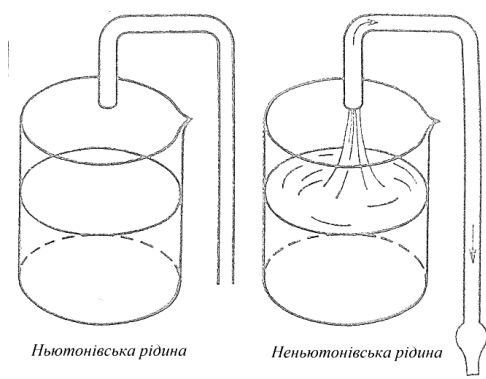


Рис. 3

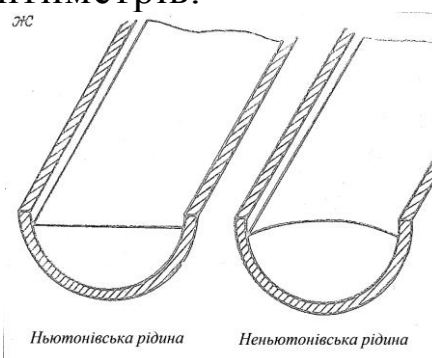


Рис. 4

Якщо в'язку рідину вилити тонким струменем на плоску поверхню такої ж рідини, що знаходиться в посудині, то в місці зіткнення струменя і поверхні спостерігається відскік струменя, як від зіткнення з твердою поверхнею.

Спостерігається у вигляді появи відскакуючого струменя, що б'є вгору на зразок маленького фонтана.

Оскільки рідина неньютонівська, утворюється невеликий насип рідини на поверхні, де рідина виходить на поверхню швидше, ніж поверхня може його поглинути. Струмінь викидається через зсув-розрідження у рідині.

Утворюється поглиблення у в'язкому насипі, яке з часом збільшується через вертикальну силу, яка діє на вузький насип і струмінь піднімається.

На ХХІ Всеукраїнському турнірі юних фізиків пропонувалася задача «Медова котушка». *Тонкий струмінь стікаючої в'язкої рідини, такої, як мед, при зіткненні з горизонтальною поверхнею цієї ж рідини, часто утворює фігуру у вигляді котушки, що навивається. Вивчіть і поясніть це явище.*

Мед – це також аномальна рідина. В'язка рідина, що падає тонкою цівкою з достатньої висоти на поверхню утворює гвинтову котушку.

Оскільки потік падає у напрямку до поверхні, він прискорюється під дією сили тяжіння. При цьому він звужується. Однак, як потік буде стикатися з поверхнею, він уповільнюється і діаметр струменя збільшується. Ця напруга у в'язкій рідині передається вгору за течією. Якщо потік швидший, ніж він може бути для плавного накладання на поверхню, напруга наростає і потік згинається у найвузчому місці.

Ця втрата стійкості переміщує струмінь в одну сторону, і починається намотування. Листи рідини також можна скласти з регулярністю.

Розглянемо в'язку тонку мотузку, радіус якої малий в порівнянні з її довжиною і з локальним радіусом кривизни власної осі. Такі об'єкти піддаються спрощеному опису. Тривимірні рівняння Нав'є-Стокса зводяться до еквівалентних одновимірних рівнянь за участю лише змінних, визначених вздовж центральної осі мотузки.

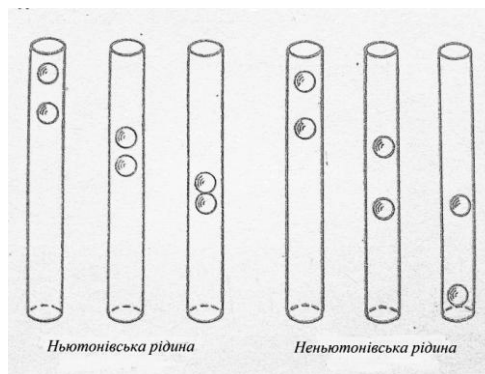


Рис. 5

Фізичні параметри, які описують явище включають густину рідини ρ , в'язкість μ (кінематична в'язкість $\nu = \mu/\rho$), витрати Q , прискорення вільного падіння g , характерний радіус нитки a_1 , висоту H .

Є три режими в навиванні «рідкої мотузки». Кожен режим включає в себе взаємодію між в'язкими, гравітаційними та інерційними силами.

В'язке намотування відбувається тоді, коли гравітаційні та інерційні сили незначні. Рідина падає з відносно малої висоти. Частота в'язкого намотування

$$\Omega_v = \frac{Q}{Ha^2}, \text{ де } Q - \text{ швидкість потоку, } H -$$

висота, з якої рідину зливають, a – радіус рідкого каната в котушці.

Це цікаво бачити, оскільки нема залежності від кінематичної в'язкості, хоча цей режим називається режимом в'язкої течії.

Гравітаційне намотування відбувається тоді, коли існує баланс між в'язкими силами і силами тяжіння, та інерція рідини є незначною. В цьому режимі висота збільшується, сили гравітації значні і розтягують рідину. Кінематична в'язкість починає вступати в гру. Частота гравітаційного намотування $\Omega_g = \left(\frac{gQ^3}{\nu a^8}\right)^{\frac{1}{4}}$, де g – прискорення сили тяжіння і ν – кінематична в'язкість.

Інерційне намотування відбувається тоді, коли рівновага між силами інерції рідкого потоку збалансована в'язкими силами (у вигляді зсуву вздовж котушки), і силою тяжіння можна знехтувати.

Частота інерціального намотування $\Omega_i = \left(\frac{Q^4}{\nu a^{10}}\right)^{\frac{1}{3}}$

В рівнянні радіус підноситься аж до десятого степеня. Це означає, що чим він менший, тим вища частота намотування.

Список використаних джерел

1. Данилов Ю. А. Физика за рубежом. Серия А (исследования): Сборник статей / Ю. А. Данилов. – М.: Мир, 1986. – 264 с.
2. Neil M. Ribe, Mehdi Habibi, Daniel Bonn: Liquid Rope Coiling. 2012. 44:249-266
3. Physics of Fluid: American Institute of Physics. American Institute of Physics - 2012. №24.
4. L. Mahadeven, W. S. Ryu, A. D. T. Samuel: Nature 392,140 (1998)

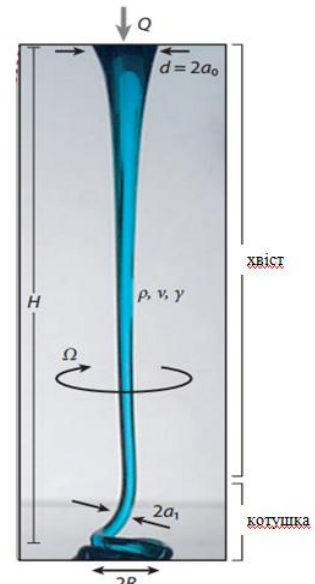


Рис.6. Рідка мотузка