

**Пилипів Любомир Дмитрович**

*кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри транспорту і зберігання нафти і газу,  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу*

**Пыльшив Любомир Дмитриевич**

*кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры транспорта и хранения нефти и газа,  
Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа*

**Pylypiv Liubomyr**

*Ph.D in Technical Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Oil and Gas Transportation and Storing  
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas*

## **АНАЛІЗ ВПЛИВУ ТИКСОТРОПНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВИСОКОВ'ЯЗКИХ НАФТ НА ЕКСПЛУАТАЦІЮ МАГІСТРАЛЬНИХ НАФТОПРОВОДІВ**

## **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТИКСОТРОПНЫХ СВОЙСТВ ВЫСОКОВЯЗКИХ НЕФТЕЙ НА ЭКСПЛУАТАЦИЮ МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДОВ**

## **ANALYSIS OF INFLUENCE THIXOTROPIC PROPERTIES OF HIGH-VISCOSITY OIL ON OPERATE THE MAIN PIPELINES**

**Анотація.** Проаналізовано механізм структуроутворення та руйнування кристалічної решітки у високов'язких нафтах в умовах перекачування магістральними трубопроводами.

**Ключові слова:** високов'язка нафта, тиксотропні властивості, релаксація.

**Аннотация.** Проанализирован механизм структурообразования и разрушение кристаллической решетки в высоковязких нефтях в условиях перекачивания магистральными трубопроводами.

**Ключевые слова:** высоковязкая нефть, тиксотропные свойства, релаксация.

**Summary.** Had analyzed the mechanism of formation of structure and destruction of the crystal lattice of the high-viscosity oil in conditions of pumping over main pipelines.

**Keywords:** high-viscosity oil, thixotropic properties, relaxation.

Експлуатація трубопроводів, що транспортують високов'язкі нафти, пов'язана зі значними труднощами, викликаними в першу чергу особливостями поведінки таких аномальних нафт. Часто реальна температура перекачування та температура навколишнього середовища є значно нижчою за температуру застигання високов'язких нафт, які ще тому і називають швидкозастигаючими. Процеси, що протікають в потоці нафти під час її перекачування магістральними трубопроводами, частково запобігають кристалізації парафінів. Однак, при зменшенні швидкості потоку або після повної зупинки транспортування відбувається інтенсивне структуроутворення в'язкої нафти з випаданням парафінів на внутрішніх стінках труб. Некерований процес застигання нафти в кінцевому

підсумку може призвести до повного закупорювання перерізу труб утвореним пластичним продуктом. З метою недопущення так званого «заморожування трубопроводів» та контролю і прогнозування режимних параметрів необхідно вивчити механізм структуроутворення у високов'язких нафтах та оцінити можливі виробничі ризики.

Поведінка більшості високов'язких парафіністичних нафт обумовлена не тільки температурою та градієнтом швидкості зсуву, а й тривалістю дії цих чинників [1, с. 20]. Неньютонівські рідини, реологічні характеристики яких залежать від часу, відносяться до тиксотропних рідин. Тиксотропними називають рідини, консистенція яких залежить від тривалості зсуву і величини швидкості зсуву. Особливістю явища

тиксотропії є її це зворотній процес, тому через деякий час структура рідини поступово відновлюється [2, с. 24; 3, с. 7]. Така особливість призводить до утворення свого роду гістерезисної петлі на кривій течії [4, с. 19]. Одна гілка петлі (так званий «прямий хід») характеризує поведінку рідини за рівномірно зростаючої швидкості зсуву, тобто під час руйнування парафінової структури нафти. Інша гілка гістерезисної петлі відображає процес відновлення структури (так звану «релаксацію»).

До неньютонівських рідин, які проявляють тиксотропні властивості, можна віднести так звані «псевдотіла». На відміну від чисто тиксотропних рідин, структура яких повністю руйнується під впливом значних напружень зсуву й поводяться подібно чистим рідинам після зняття напружень поки не відновиться структура, матеріали типу псевдотіла не втрачають повністю властивостей твердого тіла й можуть ще проявляти часткову плинність. Початкова величина границі плинності відновлюється тільки після тривалого перебування рідини в спокої.

Серед неньютонівських рідин окремо слід виділити так звані «псевдотіла», поведінка яких схожа з класичними тиксотропними рідинами. З огляду на це псевдотіло можна вважати як частковий випадок тиксотропної рідини. При цьому слід враховувати єдину відмінність між псевдотілом і класичною тиксотропною рідиною — наявність залишкового напруження зсуву  $\tau$  навіть після повного зняття навантаження. Ця властивість є важливою в першу чергу для прогнозування поведінки нафти в період між зупинкою процесу перекачування магістральним нафтопроводом і подальшим наступним його запуском.

Створення в магістральних нафтопроводах робочих тисків за рахунок дії насосного обладнання обумовлюють наявність градієнтів швидкості зсуву прошарків потоку рідини. В свою чергу напруження, що виникають при цьому, стають причинами деформації структури середовища, які у випадку рідини є незворотними. Деформації, у яких залежність між напруженням і швидкістю деформації (градієнтом швидкості зсуву) виражена через в'язкість, одержали назву в'язкісних, а стани, у яких ці деформації проявляються, називаються в'язкісними тілами [3, с. 12]. В'язкісні деформації належать до незворотних.

Механізм дії пластичної та в'язкої течії полягає в наступному [3, с.13]. В'язка течія виникає під дією будь-яких сил, які б малі вони не були, а пластична виникає у випадку, якщо напруження зсуву виявиться вищим за деяку величину, яку прийнято називати границею плинності. Обидва види течії пов'язані з витратою механічної енергії, затраченої на подолання сил внутрішнього тертя, що перешкоджають деформуванню,

а також з більшими залишковими деформаціями. Однак у в'язкій течії механічна енергія залежить від швидкості деформування, а в пластичній не залежить. У структурованих системах обидва типи течії можуть проявлятися одночасно.

Границя плинності, як уже вказувалося, визначає таке напруження, нижче якого відсутні пластичні деформації, або вони досить малі. У більшості структурованих систем поділ на зазначені зони є умовним, тобто в обох зонах спостерігаються пластичні деформації, але в одній зоні вони малі, а в другій — великі, у порівнянні із пластичними деформаціями першої зони. У цьому випадку значення напруження, що відповідає границі плинності, є умовним. У цьому сенсі й границя плинності називається умовною. Пластичними деформаціями в одній із зон зневажають або їх враховують залежно від ступеня точності поставленого завдання. Якщо мова йде про пластичну течію, тобто великі пластичні деформації, то зневажаючи малими пластичними деформаціями, одержимо природну границю плинності, хоча вона у дійсності є умовною.

В'язка течія зазвичай спостерігається в структурованих рідинах, а пластична — у твердоподібних структурах. В'язкість пластичної течії називається пластичною в'язкістю. Інакше кажучи, у структурованих рідинах границя плинності вважається майже рівною нулю і течія можлива при будь-якому як завгодно малому напруженні зсуву.

Пружні деформації форми та об'єму є результатом спотворення кристалічної решітки. Пластичні деформації виникають внаслідок залишкових змін у відносному розташуванні структурних елементів кристалічної решітки. При цьому можна виділити декілька найбільш характерних явищ, що визначають процес пластичного деформування [3, с. 14]: ковзання (зсув); двійкування; дислокації; руйнування структури, що представляє зсув кристалів, яке супроводжується порушенням зчеплення. Зі зростанням навантаження відбувається поступове ослаблення й розрив структури.

Атомно-молекулярний механізм деформацій у коагуляційній структурі інший, ніж в кристалізаційній. Пружні властивості коагуляційної структури визначаються пружними властивостями матеріалів, що становлять структуру, а також дифузійної структурованої оболонкою, що утворюється навколо більших твердих часток.

Характер пластичної деформації визначається в'язкістю тонких залишкових прошарків рідкого середовища та руйнуванням просторового каркасу, утвореного групами колоїдних часток. Це руйнування відбувається при більш слабких напруженнях, ніж у кристалічних структурах, оскільки зв'язки в каркасі визначаються лише вандерваальсовими силами. Кожна група

колоїдних часток, які становлять просторовий каркас, бере участь у коливальному русі. При прикладанні зсувного навантаження відбувається руйнування зв'язків. Але якщо навантаження мале, і, як наслідок, мала й швидкість деформування, то під впливом броунівського руху ці зв'язки відновлюються повністю. Рідина при цьому тече з постійною в'язкістю  $\eta_0$ .

Зі зростанням навантаження швидкість деформування збільшується, руйнування просторової ґратки структури превалює над відновленням, що відбувається під впливом броунівського руху, рідина тече зі змінною в'язкістю. Тому що від дотичних напружень руйнуються лише зв'язки ґратки, розташовані в площині, перпендикулярній лінії дії напруження (поперечні зв'язки), то при певному напруженні зсуву  $P = P_m$  настане момент, коли поперечні зв'язки гранично зруйнувалися, рідина знову тече з постійною в'язкістю  $\eta_m$ . Течія залишається ламінарною до  $P = P_m$ . При  $P > P_m$  ламінарний потік переходить у турбулентний. В даному випадку  $P_m$  — це межею турбулентності, тобто напруження зсуву, при якому виникає турбулентна течія, тобто напруження, що відокремлює ламінарний потік від турбулентного.

Таким чином, структура будь-якої системи характеризується не тільки структурними елементами та силами, що їх зв'язують, але й механічними властивостями — пружністю, в'язкістю, міцністю, еластичністю тощо. Системи з коагуляційною структурою володіють, як правило, незначною міцністю, пластичністю, а також деякою еластичністю. У цих системах проявляється повзучість, тобто здатність до повільного розвитку значних залишкових деформацій без значного руйнування просторової ґратки.

Усі структурні елементи (атоми, іони, молекули, міцели, кристалічні зростки) будь-якої речовини мають певну рухливість і здатні переміщатися один відносно іншого під впливом різних факторів. У результаті в речовині виникають деформації й пов'язані з ними внутрішні напруження, які здатні згодом «розсмоктуватися». Процес зниження напруження в часі одержав назву релаксації. Релаксація є наслідком теплового (броунівського) руху й відбувається в будь-яких тілах. Під релаксацією взагалі можна розуміти процес переходу від нерівноважного стану до рівноважного. Так, для рідини такий перехід може бути в результаті теплового руху кінетичних одиниць рідини. Час, протягом якого напруження зсуву зменшується в «e» ( $e = 2,71828\dots$ ) разів, називається періодом релаксації й позначається  $\Theta$ . Період релаксації визначається за залежністю

$$\Theta = \frac{\eta}{G}, \quad (1)$$

де  $G$  — модуль зсуву з закону Гука.

Період релаксації є цікавим у зв'язку з тим, що відмінність між рідким і твердим тілами визначається з порівняння періоду релаксації з часом дії сили, що викликає деформацію, тобто відмінність між твердими й рідкими тілами носить релаксаційний характер [2, с. 26]. При порівнянні періоду релаксації із часом  $\tau$  дії сили, що деформує у відповідній стадії тіло, видне, що при  $\tau > \Theta$  тіло поводить як рідина, а при  $\tau \leq \Theta$  тіло поводить як тверде, тому що за цей час течія не встигає відбутися.

Період релаксації різних тіл може залежати від напруження зсуву у відповідній стадії деформування, а може й не залежати. В останньому випадку  $\eta$  і  $G$  є або постійними, або функціями тільки координат. Якщо до рідини прикладене напруження, яке не перевищує границі міцності просторової структури, то відбувається повільний течія з постійною в'язкістю  $\eta_0$ . При дуже повільній течії коагуляційна структура зовсім не руйнується, а якщо і руйнується, то встигає знову відновитися за рахунок броунівського руху. В'язкість  $\eta_0$  відповідає структурі, у якій число зруйнованих під впливом зовнішніх сил зв'язків повністю відновлюється за рахунок броунівського руху. Така структура одержала назву практично незруйнованої структури, а в'язкість  $\eta_0$  — в'язкість практично незруйнованої структури. При подальшому підвищенні напруження зсуву руйнування коагуляційної структури перевищує її відновлення за рахунок броунівського руху, при цьому в'язкість починає знижуватися. В'язкість різко падає й потім знижується до найменшої величини  $\eta_m$ , залишаючись далі постійною, тобто знову незалежною від величини напруження зсуву. В'язкість  $\eta_m$  відповідає так званій гранично зруйнованій структурі. Залежно від ступеня руйнування структури ефективна в'язкість структурованої рідини змінюється в межах

$$\eta_m \leq \eta \leq \eta_0. \quad (2)$$

З позиції реологічних кривих можна дати визначення понять структурована рідина і твердоподібна структура. Якщо для коагуляційної структури виконані дві умови: 1) течія починається при кожному як завгодно малому напруженні зсуву; 2) стійка, стаціонарна, ламінарна течія може бути здійснена без розриву суцільності з виходом на ньютонівську течію з в'язкістю, що відповідає гранично зруйнованій структурі, то коагуляційна структура називається структурованою рідиною.

Таким чином, відмінною особливістю структурованих рідин є можливість побудови повної реологічної кривої ефективної в'язкості або течії з початковою і кінцевою ньютонівською в'язкостями.

Вивчення фізичної природи структуроутворення у високов'язких нафтах є необхідною передумовою розроблення енергоефективної технології їх

перекачування магістральними трубопроводами з мінімальними енергозатратами на транспортування та зберігання. Науково обґрунтована класифікація неньютонівських рідин дає змогу вірно вибрати реологічну модель параметрів високов'язкої нафти та на

основі ґрунтовних досліджень адекватно інтерпретувати отримані результати. Вирішення поставлених задач зробить можливим спрогнозувати поведінку парафінистих швидкозастигаючих нафт та уникнути аварійних ситуацій в трубопровідних системах.

#### Література

1. Трубопровідний транспорт високов'язких вуглеводнів: навчальний посібник [для студ. вищ. навч. закл.] / М. Д. Середюк, Л. Д. Пилипів. — Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2013. — 347 с.
2. Уилкинсон У. Неньютоновские жидкости / У. Уилкинсон. — М: Мир, 1964. — 216 с.
3. Овчинников П. Ф. Реология тиксотропных систем / П. Ф. Овчинников, Н. Н. Круглицкий, Н. В. Михайлов // — Киев: Наукова думка, 1972. — 120 с.
4. Пилипів Л. Д. Дослідження впливу термообробки високов'язкої долиньської нафти на її реологічні та транспортабельні властивості / Л. Д. Пилипів // Нафтогазова галузь України. — 2015. — № 1 (13). — С. 18–20.
5. Пилипів Л. Д. Особливості будови твердих вуглеводнів та їх вплив на рух нафти трубопроводами / Л. Д. Пилипів // Нафтогазова енергетика. — 2013. — № 1 (19). — С. 60–67.