

ОСОБЛИВОСТІ ВИТІСНЕННЯ НАФТИ ПРИ ОСЦИЛЮЮЧОМУ НАГНІТАННІ РОЗЧИНУ ПОЛІМЕРУ В ПЛАСТ ІЗ ШАРУВАТОЮ НЕОДНОРІДНІСТЮ

В. Г. Погребняк, І. В. Перкун

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, Карпатська 15,
e-mail: VGPogrebnyak@gmail.com, PerkunIV@gmail.com

Вивчено фільтраційну течію водних розчинів поліетиленоксиду (ПЕО) з молекулярними масами $4 \cdot 10^6$ і $6 \cdot 10^6$ в діапазоні концентрацій від 0 до 0,05% при осцилюючому впливі гідродинамічного поля. Отримано фотографії, що характеризують процес витіснення нафти (з в'язкістю від 10 до 50 мПа·с) водними розчинами ПЕО з модельних пористих пластів із шаруватою неоднорідністю, які дали змогу визначити ефективність різних режимів нафтовитіснення. Показано, що витіснення нафти при осцилюючому режимі нагнітання розчину полімеру в пласт з шаруватою неоднорідністю забезпечує більш високий коефіцієнт нафтовитіснення, ніж при стаціонарному режимі. Визначено умови, при яких ефекти пружних деформацій відіграють позитивну роль в процесі інтенсифікації нафтовіддачі пластів розчинами полімерів. Фільтраційна течія розчинів полімерів має відбуватися в осцилюючому режимі за появи пружних деформацій, а частота осцилюючого впливу на фільтраційний потік повинна відповідати максимуму дисипативної функції. Викладені результати досліджень течій розчинів полімерів у модельних умовах пористого пласта підтвердили механізм нелінійності фільтраційної течії розчинів полімерів. Молекулярно-надмолекулярний механізм нелінійності фільтраційної течії розчинів полімерів полягає у виникненні автоколебального режиму оборотних процесів розгортання макромолекул під дією квазірегулярних повздовжніх градієнтів швидкості, що виникають в пористому середовищі, та впливу макромолекул, що розгортаються як на молекулярному, так і на надмолекулярному рівнях, на структуру фільтраційної течії. В результаті осциляцій деформації макромолекул і розчинності динамічних надмолекулярних структур, що утворюються під дією розтягуючих течій, виникає підвищена дисипація енергії і нелінійність фільтраційної течії. Нелінійність при фільтраційній течії розчинів полімерів забезпечує вирівнювання фронту просування полімерного розчину в пористому пласті з шаруватою неоднорідністю і широке його охоплення при осцилюючому нагнітанні розчину полімеру, а, отже, більш високий коефіцієнт нафтовитіснення.

Ключові слова: осцилююча течія, розчин полімеру, градієнт швидкості, витіснення нафти, пористий пласт, в'язкість, час релаксації.

Изучено фильтрационное течение водных растворов полиэтиленоксида (ПЕО) молекулярных масс $4 \cdot 10^6$ и $6 \cdot 10^6$ в диапазоне концентраций от 0 до 0,05% при осциллирующем воздействии гидродинамического поля. Получены фотографии, характеризующие вытеснения нефти (с вязкостью от 10 до 50 мПа·с) водными растворами ПЕО из модельных пористых пластов со слоистой неоднородностью, которые позволили определять эффективность разных режимов нефтевытеснения. Показано, что вытеснение нефти при осциллирующем режиме нагнетания раствора полимера в пласт со слоистой неоднородностью обеспечивает более высокий коэффициент нефтевытеснения, чем при стационарном режиме. Определены условия, при которых эффекты упругих деформаций играют позитивную роль в процессе интенсификации нефтеотдачи пластов растворами полимеров. Фильтрационное течение растворов полимеров должно происходить в осциллирующем режиме при появлении упругих деформаций, а частота осциллирующего воздействия на фильтрационный поток должна соответствовать максимуму диссипативной функции. Изложенные результаты исследований течений растворов полимеров в модельных условиях пористого пласта подтвердили механизм нелинейности фильтрационного течения растворов полимеров. Молекулярно-надмолекулярный механизм нелинейности фильтрационного течения растворов полимеров заключается в возникновении автоколебательного режима обратимых процессов разворачивания макромолекул под действием квазирегулярно возникающих продольных градиентов скорости в пористой среде и влиянии разворачивающихся макромолекул (как на молекулярном, так и на надмолекулярном уровнях) на структуру фильтрационного течения. В результате осцилляций деформации макромолекул и растворимости динамических надмолекулярных структур, образующихся под действием растягивающих течений, возникает повышенная диссипация энергии и нелинейность фильтрационного течения. Нелинейность при фильтрационном течении растворов полимеров обеспечивает выравнивание фронта продвижения полимерного раствора в пори-

стом пласте со слоистой неоднородностью и широкий его охват при осциллирующем нагнетании раствора полимера, а, следовательно, более высокий коэффициент нефтевытеснения.

Ключевые слова: осциллирующее течение, раствор полимера, градиент скорости, вытеснение нефти, пористый пласт, вязкость, время релаксации.

The authors study the filtration flow of polyethylene oxide (PEO) water solutions of molecular weights $4 \cdot 10^6$ and $6 \cdot 10^6$ within the concentration range from 0 to 0.05% when exposed to an oscillating hydrodynamic field. Photographs characterizing the displacement of oil (with a viscosity of 10 to 50 mPa. s) with PEO water solutions from model porous formations with layered heterogeneity have been obtained. They have made it possible to specify the effectiveness of different oil displacement modes. It is shown that pumping a polymer solution into porous heterogeneous strata, while exposing it to oscillating hydrodynamic field, proved to yield a higher oil displacement ratio, as compared with a stationary oil displacement mode. The authors find out the conditions providing the positive influence on elastic deformations effects in the process of enhanced oil recovery by using polymer solutions. If elastic deformations take place, the filtration flow of polymer solutions should be carried out in the oscillating mode, whereas the frequency of the oscillating effect on the filtration flow should correspond to the dissipative function maximum. The stated results of the polymer solution flow research, under model conditions of a porous bed, have confirmed the nonlinearity mechanism of the polymer solutions filtration flow. In essence, the molecular and macromolecular non-linearity mechanism of the polymer solutions filtration flow means that in a porous medium under the influence of quasi-regular longitudinal velocity gradients, there arise self-sustained oscillations of reversible macromolecular deployment; the deployed macromolecules, in turn, influence the structure of the filtration flow, both on the molecular and macromolecular levels. Deformation oscillations of macromolecules and dissolubility of dynamic macromolecular structures formed under the influence of tensile currents result in the energy dissipation increase and the filtration flow nonlinearity. The nonlinearity of polymer solutions filtration flow ensures the alignment of the frontal advance of the polymer solutions within a porous bed with a layered heterogeneity and, consequently, higher oil displacement efficiency.

Keywords: oscillating flow, polymer solution, velocity gradient, oil displacement, porous bed, viscosity, relaxation time.

Вступ

На сьогодні існує безліч методів підвищення нафтовилучення, більшість із яких екологічно небезпечні [1-3]. Найбільш ефективні методи, які дозволяють вилучити до 40–45 % нафти, – закачування в пласт кислот, лугів та інших активних хімічних реагентів. Але в процесі видобутку нафти відбувається забруднення природного середовища. Велика шкода завдається йому хімічними реагентами під час закачування в пласт-колектор чи їх доставки на родовище [4-8]. Через це вирішення проблеми підвищення ефективності екологічних методів нафтовилучення з пластів у наш час є актуальним і своєчасним. Серед методів підвищення нафтовитіснення з пластів метод полімерного заводнення найбільш відповідає екологічним вимогам, але не завжди є високо-ефективним [9].

Аналіз публікацій та висвітлення невирішених раніше проблем

Наявні на сьогодні дані свідчать про те, що наші сучасні уявлення про процеси полімерного заводнення нафтових пластів розчинами полімерів далекі від досконалості. Це обумовлює нерозуміння спостережуваних явищ при течії розчину полімеру у нафтовому пласті-колекторі. Ефективність процесів полімерного

заводнення нафтових пластів обумовлена, з великою ймовірністю, нелінійністю фільтрації, що спостерігається при течії розчинів полімерів в умовах пласта-колектора [9-11]. Шлях до розуміння і опису явища нелінійної фільтрації розчинів полімерів значною мірою лежить через вивчення ефектів великих оборотних (а також необоротних) пружних деформацій макромолекулярних клубків в збіжних потоках (з розтягуванням) [11].

Сучасні уявлення про збіжну течію розчинів полімерів також далекі від досконалості [11]. Передусім це відноситься до питання про гідродинамічні режими течії полімерного розчину в пластах-колекторах з шаруватою неоднорідністю [9-12], а також до питання про фізичну поведінку макромолекул в умовах зазначених течій та структурні зміни в розчинах полімерів, що виникають при цьому [13-15]. Тому необхідно з'ясувати механізм значного підвищення нафтовилучення з пластів при використанні полімерів. Без розуміння природи цього механізму неможливо розробити високоефективні процеси інтенсифікації нафтовіддачі пластів за умов використання водополімерних технологій.

Особливо важливим видається аналіз закономірностей виникнення і нелінійної стадії розвитку нестійкості, пов'язаної із здатністю

макромолекул до майже повного розгортання їх ланцюгів [11-13]. Останнє, мабуть, і обумовлює накопичення розчинами полімерів значної пружної енергії, що і призводить до прояву "аномальних" ефектів у їх гідродинамічній поведінці [14,15]. Ефекти пружності і пам'яті за своєю природою нелінійні. Тому в теоретичній нафтовій гідродинаміці розчинів полімерів необхідно широко застосовувати математичні методи теорії нелінійних систем. Важливий і вибір реологічних рівнянь стану розчинів полімерів, що істотно відображають фізичні властивості при течіях із складно-напруженими умовами деформації [9,11]. У більшості теоретичних робіт для усіх режимів течії використовуються реологічні рівняння, фактично придатні лише для режиму незначної деформації. Мабуть, доцільніше застосовувати декілька реологічних рівнянь стану або використати реологічне рівняння з перемиканням [11].

Стає очевидним, що ефекти самоорганізації і нелінійності фільтраційної течії полімерного розчину в нафтовому пласт-колекторі повинні відігравати важливу роль при оптимізації режиму водополімерної інтенсифікації нафтовіддачі пластів. Також видається важливим аналіз використання водополімерних розчинів з урахуванням зміни їх властивостей за рахунок концентрації і молекулярної маси полімеру, а також під дією гідродинамічного поля [10,14,15]. Стає зрозумілим, що формування режимів полімерного заводнення нафтових пластів обумовлене, передусім, властивостями водополімерних розчинів та характеристиками пласт-колекторів, в яких тече розчин полімеру.

Механізм витіснення нафти з пласта-колектора полімерними розчинами пов'язують зі здатністю полімерів підвищувати в'язкість води і з адсорбцією макромолекул на стінки мікропор пласта [1-8]. Просуваючись пластом, розчин полімеру перемішується зі зв'язаною водою, що знаходиться в цьому пласті, реагує з нею і сорбується. При цьому змінюється в'язкість витіснювальної рідини і проникність пористого середовища для полімерного розчину. Це призводить до зниження рухливості витіснювальної рідини, а отже і до збільшення кількості вилученої нафти на одиницю рідини, що закачується. Цим же обумовлено і вирівнювання фронту витіснення і збільшення охоплення пласта заводненням.

Такі припущення не витримують серйозної критики. Простим збільшенням в'язкості води при її загущенні полімером неможливо пояснити різну ступінь зміни проникності пластів з різними розмірами пор: незалежно від в'язкості

витіснювальної рідини, в першу чергу, витіснить нафту з пластів із більшою проникністю. Адсорбційна гіпотеза також малоімовірна. Можна припустити, що ефективність нафтовитіснення розчинами полімерів, в першу чергу, пов'язана з особливостями поведінки макромолекул в умовах пористого середовища, зі значними деформаційними ефектами, що виникають при цьому. Теорія ефектів пружних деформацій, що виникають при течії з розтягом розчинів полімерів [11], дозволяє припустити, що більш високе нафтовилучення з пласта досягатиметься при осцилюючому протіканні полімерного розчину крізь пласт-колектор. Для обґрунтування цього припущення і були вивчені водні розчини ПЕО в умовах осцилюючої (нестационарної) переважно повздовжньої течії.

Мета дослідження

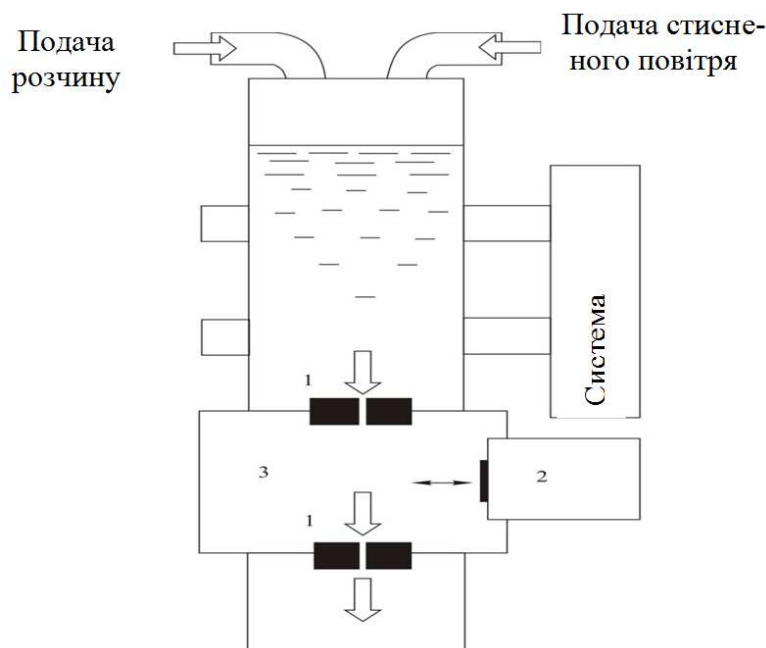
Опираючись на вищенаведене, **основною метою роботи** є встановлення закономірностей прояву ефектів пружних деформацій під час осцилюючої течії розчинів полімерів в умовах фільтраційної течії, знання яких необхідне для розуміння механізму прояву високої нафтовіддачі пластів при їх полімерному заводненні.

Матеріали та методи

Були досліджені розчини ПЕО молекулярними масами $4 \cdot 10^6$ і $6 \cdot 10^6$. Концентрація полімеру варіювалася в межах від 0 до 0,05%. Експерименти проведені за температури 25°C .

При реалізації модельного осцилюючого режиму полімерного заводнення пласта-колектора досліджуваний водний розчин ПЕО під дією постійного перепаду тиску продавлювався крізь камеру (модуль). Схема експериментальної установки представлена на рис. 1.

Установка є своєрідним віскозиметром, у якому гідрорезисторами є дві пластини з вихідними отворами. У стаціонарному режимі течія крізь отвори в пластинах утворюється внаслідок перепаду тиску на вході і виході віскозиметра, а в осцилюючому – шляхом суперпозиції постійного перепаду тиску і осцилюючого тиску, який виникає в об'ємі між пластинами з отворами під дією коливань мембрани електромагнітного вібратора. Амплітуда коливань мембрани контролювалася спеціальним пристроєм. У кожній серії дослідів за різних частот коливань мембрани амплітуда їх була постійною і вибиралася такою, щоб витрата водного розчину ПЕО крізь отвори в пластинах, викликана коливаннями мембрани, була меншою витрати, обумовленої постійним перепадом тиску. При цьому осцилююча складова швидкості по-



1) пластини з отворами; 2) електромагнітний вібратор; 3) зона впливу вібратора
Рисунок 1 – Схема експериментальної установки

току крізь отвори, що викликана пульсаціями тиску в об'ємі між двома пластинами з отворами, була меншою величини швидкості потоку крізь отвори, яка обумовлена постійним перепадом тисків у віскозиметрі. Швидкість розчину полімеру крізь отвори пластин була більшою за критичне значення [10,13-15]. Діаметр капілярів – $2 \cdot 10^{-4}$ м.

Гідродинамічну ефективність досліджуваних полімерних розчинів оцінювали за величиною ефективною в'язкості, яку визначали з порівняння витратної швидкості досліджуваного водного розчину ПЕО і калібрувальних в'язких ньютонівських рідин (вкл. і воду) за одного і того ж перепаду тиску. Уся експериментальна установка поміщалася у термостат, де температура досліджуваних розчинів контролювалася електронним терморегулятором.

Процес просування фронту води та водного розчину полімеру в пористому середовищі вивчався на спеціально розробленому оптико-механічному стенді, що має змінні гідрорезистори з різною пористістю і шаруватою неоднорідністю, які моделюють умови нафтовитіснення з пласта-колектора. Фотографія головного елемента оптико-механічному стенду – коробка, в який запресовувалися скляні або керамічні сферичні крихти, а також пісок з різним розміром зерен, наведено на рис. 2.

Середня швидкість фільтраційної течії визначалася за часом спорожнення фіксованого об'єму витіснювальної рідини, який вимірювали фотоелектронним способом. Швидкість

фільтрації варіювали від 10^{-5} до 1 м/с. Використовували зерна скляної, керамічної крихти та піску розмірами від 10^{-5} до 10^{-3} м. В одну з граней скляної коробки були вмонтовані впускний і випускний штуцери (див. рис. 2). Експерименти проводили наступним чином. Через впускний штуцер під дією певного перепаду тиску в пористе середовище подавали воду або розчин полімеру, у які додавали барвник для покращення візуального спостереження за просуванням фронту витіснення нафти. Через однакові проміжки часу проводили фотографування просування фронту витіснювальної рідини в модельному пласт-колекторі.

Виклад основного матеріалу

Результати експерименту представлені на рис. 3,а, де $\eta_{\text{еф}}$ – ефективна в'язкість водного розчину ПЕО в умовах стаціонарного витікання; $\Delta\eta_{\text{еф}}$ – додаток, що виникає в результаті осцилюючої дії на основний потік [10]. Криві відповідають різним швидкостям основної течії водного розчину ПЕО крізь отвори пластин. Виявлено критичну частоту дії $\omega'_{\text{кр}}$ на стаціонарний потік водного розчину ПЕО, починаючи з якої течія стає більше дисипативною. Зі збільшенням середньої витратної швидкості $\omega'_{\text{кр}}$ зростає, а $\Delta\eta_{\text{еф}}$ знижується. При чому меншій концентрації ПЕО в розчині за тієї ж витратної швидкості відповідає вище значення критичної частоти зовнішнього впливу на течію розчину.

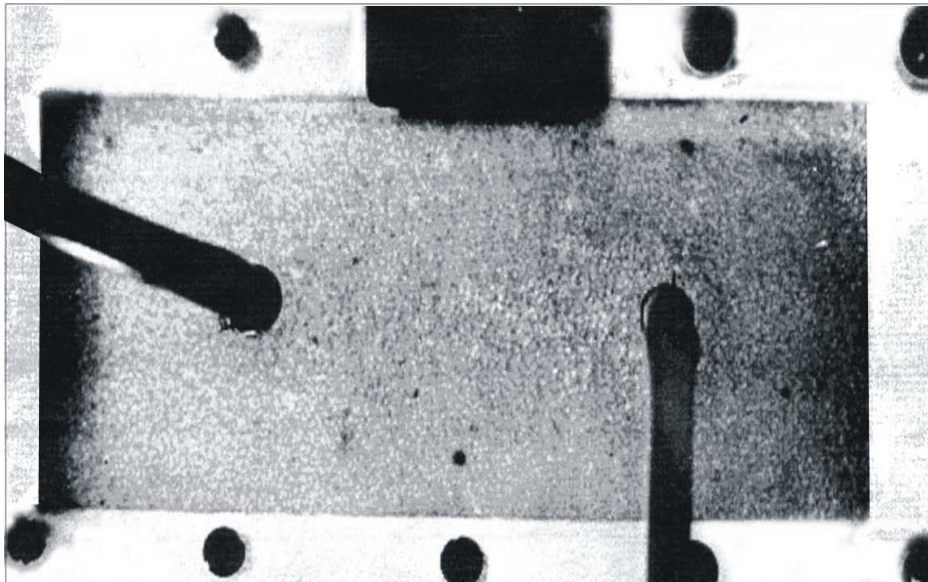


Рисунок 2 – Фотографія короба із запресованим піском, який моделює нафтовий пласт-колектор

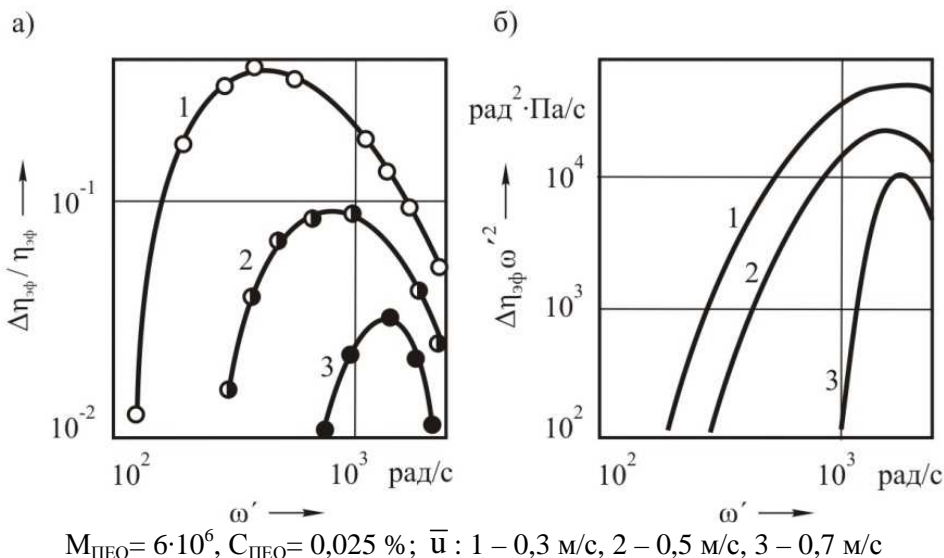


Рисунок 3 – Вплив частоти зовнішньої дії на зміни ефективної в'язкості (а) і дисипативної функції (б) при течії водного розчину ПЕО з різною середньою швидкістю крізь отвори в пластинах

При деформації полімерних систем (у нашому випадку водного розчину ПЕО) зміни величини деформації ε і напруження σ відбуваються на різних фазах [16,17]. Кут δ' , що характеризує цю різницю, є складною функцією частоти дій ω' . Деформація у нашому випадку здійснювалася під дією напруження, що змінюється згідно із законом

$$\sigma(\tau) = \bar{\sigma} + \sigma_0 \exp(i \omega' \tau). \quad (1)$$

де $\bar{\sigma}$ – стаціонарне напруження; τ – час.

Враховуючи, що $\sigma(\tau) = \sigma_0 \cos \omega' \tau$, $\varepsilon(\tau) = \varepsilon_0 \cos(\omega' \tau - \delta')$ і виключаючи час з цих рівностей, одержимо рівняння

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^2 = \varepsilon^2 \delta' + \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right) \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right) \cos \delta'. \quad (2)$$

Вираз (2) є рівнянням еліпса, площа якого дорівнює роботі A_0 , що здійснюється за цикл гармонічних коливань і безповоротно втрачається (дисипується) під час деформації. Тоді функція дисипації W обчислюється як добуток A_0 на число циклів за одиницю часу:

$$W = A_0 \frac{\omega'}{2\pi} = \frac{\varepsilon_0 \sigma_0 \omega'}{2} \sin \delta'. \quad (3)$$

З (3) видно, що дисипативна функція за однакових умов деформації залежить лише від характеристик полімеру, що виражаються значенням δ' .

Змінюючи напруження за гармонічним законом, можна стежити за зміною швидкості деформації $\dot{\varepsilon}$. Остання пов'язана з деформацією таким чином:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{d\tau} = \varepsilon_0 i \omega' \exp[i(\omega' \tau - \delta')] = i \omega' \varepsilon. \quad (4)$$

Величина відношення $\frac{\sigma}{\dot{\varepsilon}}$ є комплексною

динамічною в'язкістю η^* . Цю величину можна представити у вигляді дійсного та уявного компонент [18]

$$\eta^* = \eta' - i\eta'', \quad (5)$$

$$\text{де } \eta' = \left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 \omega'} \right) \sin \delta', \quad \eta'' = \left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 \omega'} \right) \cos \delta'.$$

Ввівши у співвідношення (3) η' , яке, зазвичай, називають просто динамічною в'язкістю, і зробивши перетворення, отримуємо

$$W = \eta' \frac{\varepsilon_0^2 \omega'^2}{2}. \quad (6)$$

Динамічна в'язкість проявляється у системі при деформації, та приріст ефективної в'язкості $\Delta\eta_{ef}$ в умовах накладення на основну течію гармонічного впливу можна віднести за рахунок появи η' . Оскільки амплітудне значення величини деформації ε_0 залишалося в експериментах постійним, можна скористатися скейлінгом і переписати (6) у виді

$$W \approx \Delta\eta_{ef} \cdot \omega'^2. \quad (7)$$

Для експериментальних кривих рис. 3,а за допомогою виразу (7) отримані криві дисипативної функції (рис. 3,б). Аналіз цих кривих показує, що з підвищенням середньої швидкості протікання водного розчину ПЕО крізь отвори в пластинах, тобто зі збільшенням частки макромолекул (через наявність молекулярно-масового розподілу), які зазнали розгортання і мають при цьому більш високий ступінь розгортання, що обумовлює наведення у макромолекул жорсткості [19], дисипація енергії пульсаційної течії зменшується. Порогове значення частоти, починаючи з якого течія стає помітно дисипативною, для менш "гнучких" і витягнутих макромолекул зростає. Зі збільшенням наведеної жорсткості макромолекул вигляд дисипативної кривої має більш виражений екстремальний характер.

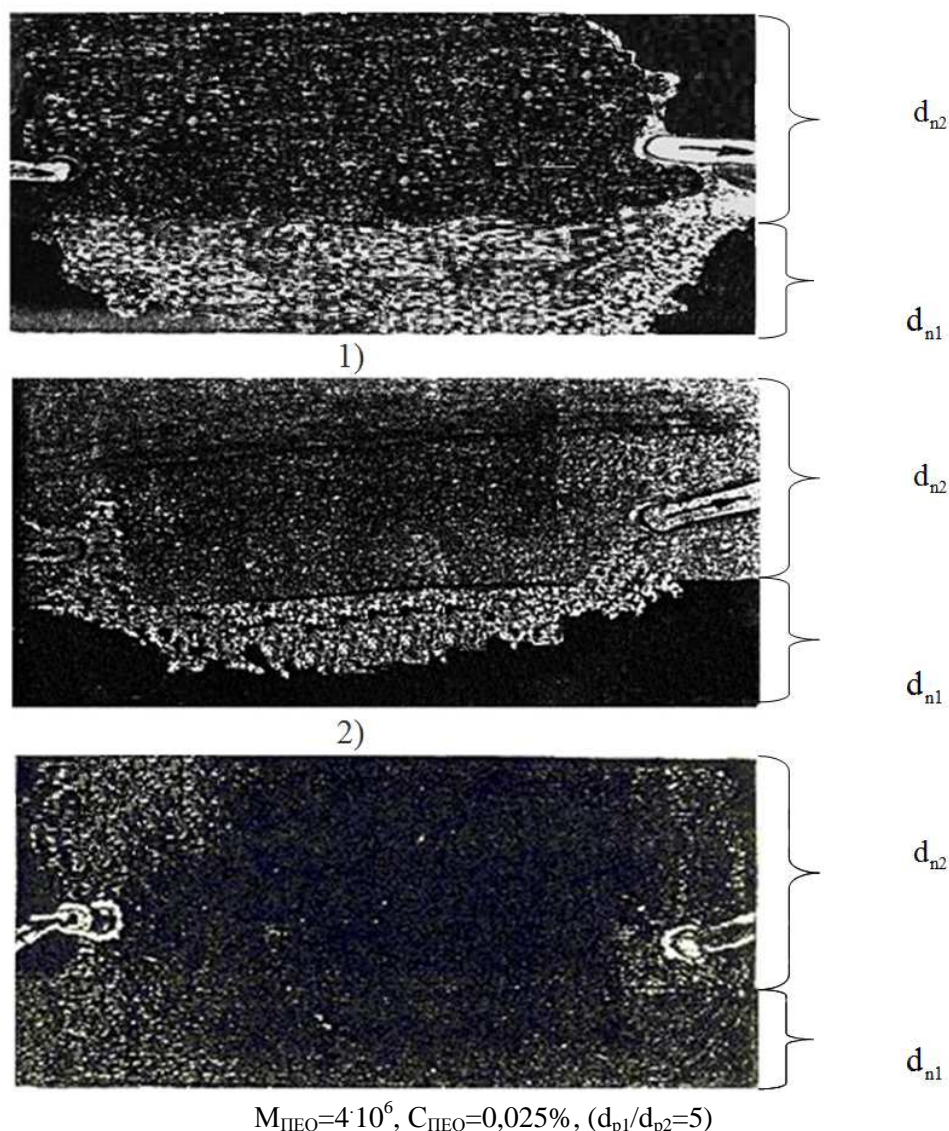
З отриманих даних виходить, що осцилюючий (нестационарний) режим полімерного заводнення нафтового пласт-колектора повинен забезпечувати більш високу, ніж при стаціона-

рному режимі, ступінь заповнення і охоплення пласта, а, значить, більш високий коефіцієнт нафтовіддачі пласта-колектора.

На рис. 4 представлені картини витіснення нафти водним розчином ПЕО з модельного пористого пласта з шаруватою неоднорідністю. В'язкість нафти варіювалася від 10 до 50 мПа·с. Експериментальна установка (рис. 2), яка використовувалася, є шаром кварцового піску, запресованого в герметизований простір між двома скляними пластинками з нагнітальним та зливним патрубками і який заповнений нафтою. Нагнітальний патрубок з'єднували або безпосередньо з мірною ємністю, в яку попередньо заливався водний розчин ПЕО, або через модуль з вібратором. У першому варіанті витіснення нафти з пористого пласта полімерним розчином здійснювалося в стаціонарному режимі, у другому – в осцилюючому. Мірна ємність забезпечена системою для реєстрації витрати розчину полімеру, що нагнітається в модельний нафтовий пласт-колектор. Нагнітання розчину здійснювалося за рахунок створення надлишкового тиску повітря в мірній ємності, яке контролюється манометром. Конструкція експериментальної установки дозволяє візуалізувати процес просування фронту полімерного розчину в пористому пласті і за фотографіями, що характеризують течії, якісно оцінювати ефективність різних режимів нафтовитіснення з модельного нафтового пласт-колектора.

Переходячи від моделі до реальної фільтраційної течії полімерного розчину і виходячи з отриманих результатів, можна стверджувати, що витіснення нафти при осцилюючому нагнітанні в пласт з шаруватою неоднорідністю забезпечує більш високу ступінь заповнення і охоплення нафтового пласта, а, значить, більш високий коефіцієнт нафтовилучення (рис. 4.3), ніж при стаціонарному (рис. 4.1).

Отримані результати добре укладаються в загальну схему саморегулюючих процесів з домінуючими негативними зв'язками. Це характерно для систем, які здатні змінювати свої властивості під дією зовнішніх фізичних впливів, у даному випадку під дією локально виникаючих повздовжніх градієнтів швидкості, тобто розтягуючих течій. Таким чином, результати даної роботи підтверджують молекулярно-надмолекулярний механізм прояву високого ступеня охоплення нафтового пласта при його заповненні розчином полімеру, який полягає у виникненні автоколивального режиму зворотних процесів розгортання макромолекул під дією квазірегулярно виникаючих повздовжніх градієнтів швидкості в нафтовому пласті-



- 1) стаціонарний режим витіснення нафти за надкритичних швидкостей;
 2) стаціонарний режим витіснення нафти за докритичних швидкостей;
 3) надкритичний режим витіснення нафти при коливній (1000 рад/с) дії на потік, що витісняє нафту з модельного пласта-колектора

Рисунок 4 – Фотографії картин полімерного заводнення розчином ПЕО модельного нафтового пласта-колектора з шаруватою неоднорідністю

колекторі та впливі макромолекулярних ланцюгів, що розгортаються як на молекулярному, так і на надмолекулярному рівнях, на структуру фільтраційної течії [10,12]. Тобто в результаті осциляцій деформації макромолекулярних клубків і динамічних надмолекулярних структур [15], що утворюються під дією розтягуючої течії, виникає підвищена дисипація енергії і нелінійність фільтраційної течії. Нелінійність фільтраційної течії забезпечує вирівнювання фронту просування і заповнення нафтових пластів з шаруватою неоднорідністю розчином полімеру, а, отже, і широке охоплення пласта.

Висновки

1. Поставлені досліди підтвердили передбачене, виходячи з теорії прояву ефектів пружних деформацій при течії з розтягом, підвищення коефіцієнта вилучення нафти з пласта-колектора при осцилюючому режимі його заповнення.

2. Отримані дані вносять додаткову ясність в питання про природу механізму “аномального” підвищення нафтовилучення пластів розчинами полімерів. З упевненістю можна стверджувати, що ефекти, які зумовлюють високодисипативний режим при осцилюючому режимі заповнення пласт-колектора, відіграють ва-

жливу роль при вдосконаленні процесу полімерного заводнення.

3. Полімерне заводнення пласт-колектора повинне відбуватися в осцилюючому режимі за появи пружних деформацій, а частота пульсаційного впливу на водополімерну фільтраційну течію повинна відповідати максимуму дисипативної функції (7).

Література

1. Lyadova N. A., Raspopov A. V., Muzhikova L. N. et al. The experience of tertiary recovery methods on Perm Region reservoirs. *Oil Industry*. 2015. No. 7. P. 92–95.

2. Bondarenko A.V., Kudryashova D.A. The application of hydrodynamic modeling for predictive effectiveness assessment of polymer flooding technology on Moskudinskoye field. *Oil Industry*. 2015. No.10. P. 102–105.

3. Tekhnicheskiiy spravochnik dlya raboty s Tempest 6.0 MORE (Technical reference for Tempest 6.0 MORE). M.: Publ. of ROXAR. 2003. No. 45–53.

4. Idahosa P.E.G., Oluyemi G.F., Oyenyin M.B., Prabhu R. Rate-dependent polymer adsorption in porous media. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2016. Vol. 143. P. 65–71.

5. Demikhova I.I., Likhanova N.V., Hernandez P.J.R. et al. Emulsion flooding for enhanced oil recovery: Filtration model and numerical simulation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2016. Vol. 143. P. 235–244.

6. Al-Hashmi A. R., Luckham P. F., Grattoni C. A. Flow-induced-microgel adsorption of high-molecular weight polyacrylamides. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2013. Vol. 112. P. 1–6.

7. Mohsin M.A., Attia N.F. Inverse emulsion polymerization for the synthesis of high molecular weight polyacrylamide and its application as sand stabilizer. *International Journal of Polymer Science*. 2015. 10 p.

8. Kachurin A., Sattarov R., Ayupova D., Gabdullina A. Improvement of the technology of strata oil recovery enhancement using SoftPusher Polyacrylamide in the fields of LUKOIL – Western Siberia OOO. *Oil Industry*. 2011. No. 8. P. 126–128.

9. Погребняк А. В., Перкун І. В., Погребняк В. Г. Особливості течії розчину полімеру в тріщинувато-пористому колекторі. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2018. № 3 (68). С. 19–26.

10. Pogrebnyak A., Pogrebnyak V. Hydrocutting of Products. *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*. 2017. Vol. 3. No. 1. P. 1–8.

11. Погребняк В. Г., Волошин В. С. Энергобережения і ефект Томса / за ред. Ю. Ф. Іванюти. Київ: Освіта України, 2017. 440 с.

12. Pogrebnyak A., Kryvenko G, Perkun I., Pogrebnyak V. The Nature of Hydrodynamic Drag Reduction of Oil Flow in Pipelines by Polymer Additions. *Petroleum Science and Engineering*. 2017. Vol. 2. No. 3. P. 79–85.

13. Pogrebnyak V., Kryvenko S. Improvement of Water Fire-Fighting Systems at Oil field Territories. *Petroleum Science and Engineering*. 2017. Vol. 1. No.2. P. 53–57.

14. Pogrebnyak A. V., Perkun I. V., Pogrebnyak V. G. Degradation of Polymer Solutions in a Hydrodynamic Field with a Longitudinal Velocity Gradient. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2017. Vol. 90. No 5. P. 1219–1224.

15. Pogrebnyak A., Pogrebnyak V. Mechanism of the High Efficiency of the Cutting Products Using Water-jet with Polymer Additions. *Journal of Science and Technology*. Odesa: ONAFT, 2017. Vol. 11. No. 2. P. 73–78

16. Ferry J. D. Viscoelastic properties of polymer. New York: John Wiley & Sons, 1980. 641 p.

17. Mailkin A. Y. Current Status of Polymer Rheology: achievements and problems. *Polymer Sci. Ser. A*. 2009. Vol. 51. No. 1. P. 106–136.

18. Виноградов Г. В., Малкин А. Я. Реология полимеров. М.: Химия, 1977. 438 с.

19. Ельяшевич Г. К., Френкель С. Я. Термодинамика ориентации растворов и расплавов полимеров. *Ориентационные явления в растворах и расплавах полимеров*. М.: Химия, 1980. С. 9–90.

References

1. Lyadova N. A., Raspopov A. V., Muzhikova L. N. et al. The experience of tertiary recovery methods on Perm Region reservoirs. *Oil Industry*. 2015. No. 7. P. 92–95.

2. Bondarenko A.V., Kudryashova D.A. The application of hydrodynamic modeling for predictive effectiveness assessment of polymer flooding technology on Moskudinskoye field. *Oil Industry*. 2015. No.10. P. 102–105.

3. Tekhnicheskiiy spravochnik dlya raboty s Tempest 6.0 MORE (Technical reference for Tempest 6.0 MORE). M.: Publ. of ROXAR. 2003. No. 45–53.

4. Idahosa P.E.G., Oluyemi G.F., Oyenyin M.B., Prabhu R. Rate-dependent polymer adsorption in porous media. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2016. Vol. 143. P. 65–71.
5. Demikhova I.I., Likhanova N.V., Hernandez P.J.R. et al. Emulsion flooding for enhanced oil recovery: Filtration model and numerical simulation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2016. Vol. 143. P. 235–244.
6. Al-Hashmi A. R., Luckham P. F., Grattoni C. A. Flow-induced-microgel adsorption of high-molecular weight polyacrylamides. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2013. Vol. 112. P. 1–6.
7. Mohsin M.A., Attia N.F. Inverse emulsion polymerization for the synthesis of high molecular weight polyacrylamide and its application as sand stabilizer. *International Journal of Polymer Science*. 2015. 10 p.
8. Kachurin A., Sattarov R., Ayupova D., Gabdullina A. Improvement of the technology of strata oil recovery enhancement using SoftPusher Polyacrylamide in the fields of LUKOIL – Western Siberia OOO. *Oil Industry*. 2011. No. 8. P. 126–128.
9. Pogrebnyak A. V., Perkun I. V., Pogrebnyak V. G. Osoblivosti techiyi rozchinu polimeru v trishinuvato-poristomu kolektori. *Rozvidka ta rozrobka naftovih i gazovih rodovish*. 2018. No. 3 (68). P. 19–26.
10. Pogrebnyak A., Pogrebnyak V. Hydrocutting of Products. *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*. 2017. Vol. 3. No. 1. P. 1–8.
11. Pogrebnyak V. G., Voloshyn V. S. Energozberezhennya i efect Thomsa / za red. Yu. F. Ivaniuty. Kyiv: Osvita Ukrainy, 2017. 440 p.
12. Pogrebnyak A., Kryvenko G, Perkun I., Pogrebnyak V. The Nature of Hydrodynamic Drag Reduction of Oil Flow in Pipelines by Polymer Additions. *Petroleum Science and Engineering*. 2017. Vol. 2. No. 3. P. 79–85.
13. Pogrebnyak V., Kryvenko S. Improvement of Water Fire-Fighting Systems at Oil field Territories. *Petroleum Science and Engineering*. 2017. Vol. 1. No.2. P. 53–57.
14. Pogrebnyak A. V., Perkun I. V., Pogrebnyak V. G. Degradation of Polymer Solutions in a Hydrodynamic Field with a Longitudinal Velocity Gradient. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2017. Vol. 90. No 5. P. 1219–1224.
15. Pogrebnyak A., Pogrebnyak V. Mechanism of the High Efficiency of the Cutting Products Using Water-jet with Polymer Additions. *Journal of Science and Technology*. Odesa: ONAFT, 2017. Vol. 11. No. 2. P. 73–78
16. Ferry J. D. Viscoelastic properties of polymer. New York: John Wiley & Sons, 1980. 641 p.
17. Mailkin A. Y. Current Status of Polymer Rheology: achievements and problems. *Polymer Sci. Ser. A*. 2009. Vol. 51. No. 1. P. 106–136.
18. Vinogradov G. V., Malkin A. Ya. Reologiya polimerov. M.: Himiya, 1977. 438 p.
19. Elyashevich G. K., Frenkel S. Ya. Termodinamika orientacii rastvorov i rasplavov polimerov. *Orientacionnye yavleniya v rastvorah i rasplavah polimerov*. M.: Himiya. 1980. P. 9–90.