

## ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ ПЕРФОРАЦІЇ СВЕРДЛОВИН СТРУМЕНЕМ РОЗЧИНУ ПОЛІМЕРУ

В. Г. Погребняк\*, І. І. Чудик, А. В. Погребняк, І. В. Перкун

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. +38 050 1351545,  
e-mail: VGPogrebnyak@gmail.com

Отримані нові знання з динаміки розчинів полімерів у модельних умовах течії крізь сопла гідроперфоратора, які формують високошвидкісний струмінь, стали основним науковим підґрунтям для обґрунтування водополімерного способу гідроперфорації свердловин нафти і газу. Дослідження реакції розчинів полімерів на гідродинамічний вплив з розтягом дозволило сформулювати структурну концепцію, «спільним знаменником» якої є сильний деформаційний вплив гідродинамічного поля з розтягом на макромолекулярні клубки, що, за теорією нерівноважної термодинаміки, повинно породжувати прояв своєрідної гумоподібної високоеластичності. Вивчено особливості гідродинамічної поведінки водних розчинів полімеру при течії в модельних умовах струменеформуючих сопел гідроперфоратора. Фотографії картин течії водного розчину поліетиленоксиду у вхідній ділянці сопла, отримані у схрещених поляроїдах, свідчать про локалізацію подвійної променезаломлюючої зони поблизу осі потоку. Експериментально доведено можливість переходу в сильно розгорнутий стан клубків макромолекул поліетиленоксиду в умовах вхідної ділянки сопла гідроперфоратора. Відношення виміряного подвійного променезаломлювання до гранично можливого сягає 0,35–0,46, що відповідає 60–70% ступеня розгорнутості макромолекулярних клубків. З'ясовано механізм перфорації свердловин нафти і газу високошвидкісним струменем водного розчину полімеру. Доведено, що механізм високої ріжучої здатності високошвидкісного струменя водного розчину полімеру полягає в руйнівній дії динамічного тиску водополімерного струменя, «армованого» сильно розгорнутими макромолекулярними ланцюгами у вхідних ділянках сопел гідроперфоратора під дією розтягуючої течії. Експериментальна апробація запропонованого способу перфорації нафтогазових свердловин високошвидкісним струменем водного розчину поліетиленоксиду підтвердила практичну і економічну доцільність його використання.

Ключові слова: свердловина нафти і газу, макромолекулярний ланцюг, променезаломлююча зона, сопла гідроперфоратора, струмінь розчину полімеру.

Полученные новые знания по динамике растворов полимеров в модельных условиях течения через струеформирующее сопло гидрорперфоратора стали научной основой для обоснования водополимерного способа гидрорперфорации скважин нефти и газа. Исследование реакции растворов полимеров на гидродинамическое воздействие позволило сформулировать структурную концепцию, «общим знаменателем» которой стало мощное деформационное воздействие гидродинамического поля с растяжением на макромолекулярные клубки, что, с точки зрения неравновесной термодинамики, должно порождать проявление своего рода резиноподобной высокоэластичности. Изучены особенности гидродинамического поведения водных растворов полимера при течи в модельных условиях струеформирующих сопел гидрорперфоратора. Фотографии картин течения водного раствора полиетиленоксида во входной области сопла, полученные в скрещенных поляроидах, свидетельствуют о локализации двойной лучепреломляющей зоны вблизи оси потока. Экспериментально доказана возможность перехода в сильно развернутое состояние макромолекул полиетиленоксида в условиях входной области сопла гидрорперфоратора. Отношение измеренного двойного лучепреломления к предельно возможному достигает 0,35–0,46, что соответствует 60–70% степени развернутости макромолекулярных клубков. Выяснен механизм перфорации скважин нефти и газа высокоскоростной струей водного раствора полимера. Доказано, что механизм высокой режущей способности высокоскоростной струи водного раствора полимера заключается в разрушительном действии динамического давления водополимерной струи, «армированной» сильно развернутыми макромолекулярными цепями во входной области сопел гидрорперфоратора под действием растягивающего течения. Опытная апробация предложенного способа перфорации скважин нефти и газа высокоскоростной струей водного раствора полиетиленоксида подтвердила практическую и экономическую целесообразность его использования.

Ключевые слова: скважина нефти и газа, макромолекулярная цепь, лучепреломляющая зона, сопла гидрорперфоратора, струя раствора полимера.

*New data on the polymer solutions' dynamics in the model conditions of flow through the hydroperforator nozzles, which form a high-velocity jet, has become the main scientific basis for substantiating the water-polymer method of hydroperforation of oil and gas wells. The study of the reaction of polymer solutions to tension hydrodynamic influence allowed us to formulate a structural concept, the "common denominator" of which is the strong deformation effect of tension hydrodynamic field on macromolecular coils, which, according to nonequilibrium thermodynamics, should cause a particular kind of rubber-like high elasticity. Peculiarities of hydrodynamic behaviour of aqueous polymer solutions in model conditions of flow through jet-forming nozzles have been studied. The flow photographs of polyethylene oxide aqueous solution in the nozzle inlet, obtained in crossed polaroids, indicate the localization of the birefringent zone near the flow axis. The possibility of transition to a highly developed state of the tangle of polyethylene oxide macromolecules in the conditions of the inlet section of the nozzle of the hydroperforator has been experimentally proved. The ratio of the measured birefringence to the maximum possible reaches 0.35–0.46, which corresponds to 60–70% of the macromolecular coils deployment degree. The mechanism of perforation of oil and gas wells by a high-velocity jet of an aqueous polymer solution has been elucidated. It has been proved that the high cutting ability mechanism of the aqueous polymer solution high-velocity jet is the destructive effect of the dynamic pressure of water-polymer jet "reinforced" by highly developed macromolecular chains in the inlet hydroperforator nozzles under the action of tensile flow. Experimental testing of the well perforation method by a high-speed jet of the polyethylene oxide aqueous solution has confirmed the practical and economic feasibility of its use.*

Keywords: oil and gas well, macromolecular chain, refractive zone, hydroperforator nozzles, polymer solution jet.

### Вступ

У процесі гідроперфорації свердловин нафти і газу як ріжучий орган використовується високошвидкісний струмінь рідини. Від властивостей технологічної рідини залежить здатність до отримання необхідних гідродинамічних характеристик гідроструменя, які забезпечують максимальну продуктивність і найкращу якість перфорації з найменшими енерговитратами на формування струменя. Мінімізація енергетичних витрат, передусім, повинна забезпечуватися за рахунок пониження робочого тиску рідини перед соплом гідроперфоратора, що відповідає технологічним вимогам до перфорації нафтогазових свердловин. Тому вибір типу і складу руйнуючої рідини є одним з основних питань, яке необхідно вирішувати під час розроблення технологічного процесу перфорації свердловин нафти і газу.

Як руйнуюча рідина при гідроперфорації свердловин нафти і газу може використовуватися вода з домішками абразиву [1]. Введення у водяний струмінь абразивних добавок суттєво розширює технологічні можливості процесу перфорації свердловин. Досвід застосування гідропіскоструминної перфорації (ГПСП) свердловин нафти і газу виявив значні переваги порівняно з іншими способами перфорації, наприклад з використанням вибуху кумулятивних зарядів. Проте цей спосіб має і суттєвий недолік – інтенсивне гідроабразивне зношування внутрішніх поверхонь насосно-компресорних труб, арматури і обладнання, які використовуються під час приготування, транспортування та використання ріжучої рідини. В результаті гідроабразивного зношування збільшується діаметр і профіль отворів сопел, які формують

ріжучий струмінь, що призводить до поступового зменшення швидкості руху гідроабразивного струменя і, як наслідок, до погіршення процесу формування каналів в обсадних колонах нафтогазових свердловин та збільшення загального часу перфорації. Також виникає необхідність у додаткових витратах на сопла та на збільшення кількості спуско-підіймальних операцій для їх заміни. Ще одним недоліком є глибоке проникнення абразивних частинок піску в породу сформованих каналів, що погіршує віддачу пласта. Все це призводить до збільшення ресурсоенергоємності процесу гідроперфорації свердловин нафти і газу.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій та висвітлення невирішених проблем

Недоліки ГПСП можна усунути, якщо ріжучий гідроабразивний струмінь замінити на струмінь розчину полімеру [2-4]. При цьому полімер має бути безпечною речовиною та дозволеною для використання в нафтогазовій галузі. Таким полімером можна вважати поліетиленоксид (ПЕО), поліакриламід (ПАА), гідролізований поліакриламід (ГПАА) та інші. Наприклад, ПЕО є безпечною речовиною, яка використовується як флокулянт для очищення і знезараження питної води та загусник в харчовій промисловості, при виготовленні фармацевтичних виробів тощо [5].

На жаль, наші сучасні уявлення про поведінку макромолекул в умовах збіжної течії, яка реалізується у вхідній ділянці струменеформуєчого сопла гідроперфоратора, далекі від досконалості. Однак, на даний час відбувається перехід від накопичення експериментальної інформації до розуміння фізико-хімічної сутно-

сті особливостей, які виникають при збіжній течії розчинів полімерів, і встановлення основних закономірностей прояву при цьому гумоподібної високоеластичності. Для розуміння реофізики прояву ряду особливостей у гідродинамічній поведінці розчинів полімерів при їх течії крізь струменеформує соплі гідроперфоратора потрібні нові знання, які б дозволили розробити технологію перфорації свердловин нафти і газу високошвидкісним струменем розчину полімеру за умови ресурсоенергозбереження та екологічності видобування вуглеводнів.

Особливий науковий і практичний інтерес становлять динамічні фазові переходи, в результаті яких виникають структури, далекі від рівноважних. Можливість протікання доводить нерівноважна термодинаміка. Однак ці переходи добре вивчені лише в концентрованих полімерних розчинах.

Найбільш суттєвими є результати вивчення структурних змін в розчинах полімерів під дією гідродинамічного поля, отримані в роботах [6], де доведено можливість протікання динамічних фазових переходів в умовах поздовжнього гідродинамічного поля. Однак, цей результат відноситься до однорідного поздовжнього поля, а не до збіжної течії, яка здійснюється у вхідній ділянці сопла гідроперфоратора.

Викладене свідчить про актуальність досліджень природи високої руйнівної здатності водополімерного струменя. За результатами огляду збіжної [7] і турбулентної течій розчинів полімерів [8] та використання полімерних домішок для різання матеріалів [2, 4, 9] стає очевидним, що до розроблення технології високо-ефективної перфорації свердловин нафти і газу можна підійти, використовуючи для цього спостережувані особливості в гідродинамічній поведінці розчинів полімерів при поздовжній течії, яка здійснюється у вхідній ділянці струменеформує соплі гідроперфоратора.

#### Мета дослідження

Опираючись на вищенаведене, **основною метою роботи** є встановлення особливостей процесу перфорації свердловин нафти і газу високошвидкісним струменем розчину полімеру, знання яких необхідне для розуміння механізму прояву високої руйнівної здатності струменя водного розчину полімеру.

#### Методи та матеріали

У ході проведення експериментальних досліджень було використано такі технічні засоби: водомет, який забезпечував тиск у струменеформує соплі – 450 МПа і середню

швидкість струменя – до 350 м/с; створений на основі установки УРГ-3020 гідростенд з робочим тиском до 500 МПа і можливістю змінювати та контролювати як інтегральні, так і диференціальні параметри процесу руйнування різних матеріалів водополімерним струменем [4]; оптико-механічний комплекс для вивчення особливостей течії розчинів полімеру в модельних умовах струменеформує соплів різних конфігурацій; поляризаційно-оптична установка для вивчення динаміки макромолекул полімеру у модельних умовах вхідної ділянки різних за конфігурацією соплів гідроперфоратора; капілярні та ротаційні віскозиметри для реологічних вимірів; спеціальний гідродинамічний комплекс для дослідження структури течії розчинів полімерів у модельних умовах струменеформує соплів гідроперфоратора.

Про ступінь розгорнутості макромолекулярних ланцюгів ПЕО судили за співвідношенням  $\frac{\Delta n}{\Delta n_{\infty}}$ , де  $\Delta n$  – виміряне подвійне променезаломлення (ППЗ),  $\Delta n_{\infty}$  – гранично можливе ППЗ, розраховане для концентрації використаного водного розчину ПЕО. Слід зазначити, що під час розрахунку  $\Delta n_{\infty}$  для водних розчинів ПЕО необхідно враховувати ефекти ППЗ, що виникають внаслідок різниці між показниками заломлення ПЕО і його розчинника – води. ППЗ водного розчину ПЕО, що піддається одновісній деформації, обумовлене оптичною анізотропією і орієнтацією сегментів макромолекул ПЕО, розраховували за формулою [10]:

$$\Delta n = \frac{2\pi}{9} \frac{(n_c^2 + 2)^2}{n} (\alpha_1 - \alpha_2) N^* F_0 \quad (1)$$

Тут  $n_c$  – показник заломлення розчину,  $(\alpha_1 - \alpha_2)$  – різниця між поляризованістю сегментів,  $N^*$  – їх число в одиниці об'єму,  $F_0 = \frac{(3 \cos^2 \gamma' - 1)}{2}$  – параметр орієнтації сегментів,  $\langle \cos^2 \gamma' \rangle$  – середньоквадратичний косинус кута  $\gamma'$  орієнтації сегментів, відлічуваний відносно головного напрямку розтягування розчину. Величина  $(\alpha_1 - \alpha_2)$  визначається як [11]:

$$(\alpha_1 - \alpha_2) = (\alpha_1 - \alpha_2)_\ell + (\alpha_1 - \alpha_2)_f + (\alpha_1 - \alpha_2)_{fs} \quad (2)$$

де  $(\alpha_1 - \alpha_2)_\ell$  – різниця між поляризованостями сегмента, обумовлена його власною оптичною анізотропією;  $(\alpha_1 - \alpha_2)_f$  і  $(\alpha_1 - \alpha_2)_{fs}$  –

внесок в різницю поляризованостей сегмента, обумовлені анізотропією макроформи молекулярного ланцюга і анізотропією самого сегмента (анізотропією мікроформи).

Згідно з [12]  $(\alpha_1 - \alpha_2)_f \rightarrow 0$  для гранично розгорнутого стану макромолекули, а

$$(\alpha_1 - \alpha_2)_{fs} = \left( \frac{n_p^2 - n_s^2}{4\pi \cdot n_s} \right) (L'_2 - L'_1) \frac{M_s}{\rho_p N_A}, \quad (3)$$

де  $n_p$  і  $n_s$  – показники заломлення ПЕО і розчинника – води;  $L'_1$  і  $L'_2$  – коефіцієнти, які залежать від асиметрії форми сегмента;  $N_A$  – число Авогадро;  $M_s$  – молекулярна маса сегмента ПЕО;  $\rho_p$  – густина ПЕО.

При розрахунках  $\Delta n_\infty$  для водних розчинів ПЕО приймали  $(\alpha_1 - \alpha_2) = 18 \cdot 10^{-25} \text{ см}^3$  [13];  $M_s = 308$ ;  $\rho_p = 1,12 \text{ г/см}^3$ ;  $n_s = 1,338$ ;  $n_p = 1,46$ . Значення  $L'_2 - L'_1$ , рівне 5,4, було визначено за наведеною у [12] залежністю  $(L'_2 - L'_1)$  від  $p$ , де  $p$  – відношення довжини сегмента до його поперечного розміру. Було знайдено  $\Delta n_\infty = 4,12 \cdot 10^{-2} \text{ г/см}^3$ . Внесок анізотропії мікроформи сегмента ПЕО у значення  $\Delta n_\infty$  приблизно дорівнює 36 % [14].

Було досліджено розчини ПЕО з молекулярними масами  $4 \cdot 10^6$  і  $6 \cdot 10^6$ . Концентрація полімеру варіювалася від 0 до 0,1 %. Розчини з повністю розчиненим до потрібної концентрації ПЕО готували в темному посуді шляхом розбавлення раніше приготованих 0,1 % розчинів полімеру впродовж 7–8 діб. Оскільки водні розчини ПЕО (та інших полімерів) значно змінюють свої властивості при тривалому зберіганні, як стабілізатор використали 0,05 % домішку йодистого калію, яка практично повністю виключає старіння ПЕО у воді, не впливає на гідродинамічну активність полімера [15].

### Виклад основного матеріалу

Перфораційні роботи проводили на лабораторних стендах. Для формування високошвидкісного потоку рідини використовували лабораторний гідростенд на основі установки УРГ-3020 з робочим тиском до 500 МПа. Використовували багатошарову модель перешкоди (мішені), на якій випробовували ефективність перфорації, яка була сформована з листа товщиною 10 мм із сталі категорії міцності Д згідно з ГОСТ 632-80, шару бетону товщиною 20 мм аналога цементного кільця, і шару породи

у вигляді кернів (міцність на стискання  $600 \text{ кг/см}^2$ ) загальною товщиною 800 мм [3,16].

Результати, отримані під час формування каналу у тілі модельної перешкоди водополімерним струменем ПЕОз концентрацією 0,0025% – 0,008% та молекулярною масою  $6 \cdot 10^6$ , що витікає з тиском 200 МПа крізь струменеформує сопло діаметром  $3 \cdot 10^{-3}$  і часом проведення перфорації 10 хв., наведені в табл. 1.

**Таблиця 1 – Вплив концентрації ПЕО на довжину сформованого каналу в модельній перешкоді**

№ досліджу	$C_{\text{ПЕО}}$ , %	Довжина сформованого каналу, мм
1	0,0025	245
2	0,003	385
3	0,005	405
4	0,007	430
5	0,008	435

Зменшення концентрації ПЕО нижче 0,003% різко знижує ефективність процесу перфорації. Збільшення концентрації вище 0,007% суттєво не впливає на ефективність формування каналу, і є неефективним з точки зору раціонального використання ПЕО.

Також формування каналу у тілі модельної перешкоди водополімерним струменем ПЕО з концентрацією 0,005 % проводили за різних тисків ріжучої рідини. Результати наведені у табл. 2.

**Таблиця 2 – Вплив тиску ріжучої рідини на довжину сформованого каналу в модельній перешкоді за концентрації ПЕО 0,005%**

№ досліджу	Тиск ріжучої рідини, МПа	Довжина сформованого каналу, мм
6	75	225
7	100	380
8	200	405
9	300	420
10	350	425

Пониження тиску ріжучої рідини нижче 100 МПа знижує ефективність перфорації, а збільшення понад 300 МПа при незначному прирості довжини каналу призводить до технічних труднощів, пов'язаних з підтриманням таких високих тисків. Слід зазначити, що дослідно-промислова апробація запропонованого способу перфорації свердловин високошвидкісним струменем водного розчину ПЕО підтвердила практичну і економічну доцільність його використання.

Таблиця 3 – Вплив концентрації ПЕО у водному розчині і відстані від зрізу насадки до перешкоди на характер взаємодії з нею струменя розчину ПЕО

№ мішені	C <sub>ПЕО</sub> , %	Відстань до мішені, м	Середня швидкість струменя, м/с	Характер пробою мішені
2	0	1,5	255	діаметр отвору - $(15-18) \cdot 10^{-3}$ м
3	0	1,75	250	немає пробою
5	0	2,5	250	немає пробою
6	0,0004	1,5	240	діаметр отвору - $(15-18) \cdot 10^{-3}$ м
8	0,0004	2	235	немає пробою
9	0,0008	2,5	230	діаметр отвору $(8-10) \cdot 10^{-3}$ м

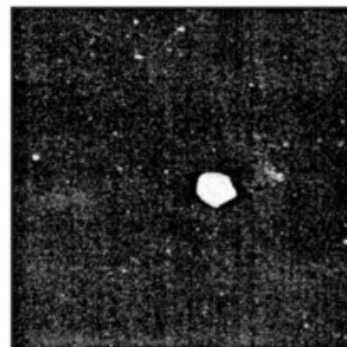
Мішень 2



Мішень 6



Мішень 9



2 – вода; 6 –  $M_{\text{ПЕО}} = 6 \cdot 10^6$ ,  $C_{\text{ПЕО}} = 0,0004\%$ ; 9 –  $M_{\text{ПЕО}} = 6 \cdot 10^6$ ,  $C_{\text{ПЕО}} = 0,0008\%$

Рисунок 1 – Фотографії перешкод-мішеней після взаємодії зі струменями води і водного розчину ПЕО

Порівнюючи результати випробувань, наведених в таблицях 1 і 2, можна стверджувати, що домішки полімерів у вибраному діапазоні концентрацій підвищують руйнівну здатність струменя, сприяючи більш ефективному формуванню каналів при перфорації свердловин, що дозволяє більш раціонально використовувати потенціал нафтових та газових родовищ.

Наявність підвищення руйнівної здатності струменя води з домішками полімеру була також підтверджена в експериментах з використанням водомета промислового виготовлення. Детальний опис його гідродинамічної частини і технічних характеристик, а також методику визначення середньої швидкості, імпульсу і енергії струменя можна знайти у роботах [17,18]. Для якісної оцінки енергетичних можливостей струменя вивчали взаємодію струменя з перешкодою, встановленою на фізичному маятнику. Перешкода була виготовлена із сталевих (Ст3) листів розмірами  $(220 \times 220 \times 3) \cdot 10^{-3}$  м з кріпильними отворами  $16 \cdot 10^{-3}$  м по кутах. Між площиною перешкоди і тілом фізичного маятника був проміжок у  $5 \cdot 10^{-2}$  м. Використовували ПЕО з молекулярною масою  $6 \cdot 10^6$  [2].

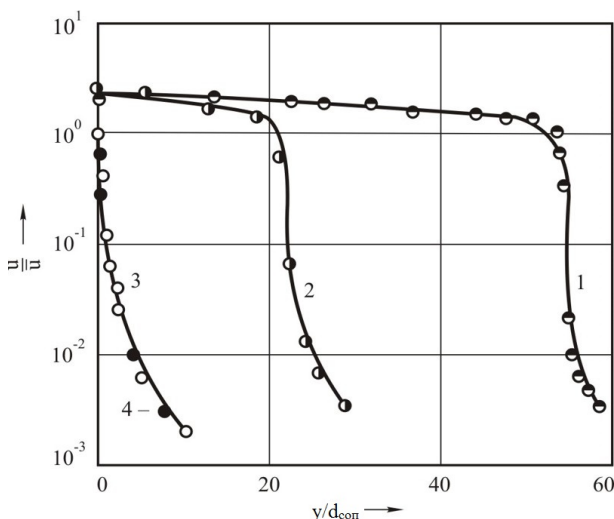
Відповідно до результатів дослідів, що відображені в табл. 3 і на рис. 1, можна зробити такі висновки: максимальна відстань від водомета до перешкоди, коли ще спостерігається її пробій, складає для води 1,5 м, а для 0,0008%-го водного розчину полімеру – 2,5 м; прояв ефективності домішок ПЕО спостерігався від концентрації 0,004%; наявність домішок ПЕО знижує середню швидкість струменя.

Для підтвердження правильності цього підходу необхідно експериментально довести наявність сильної деформаційної дії на молекулярні клубки гідродинамічного поля в струменеформуючому соплі гідроперфоратора. При цьому очевидні переваги використання течій у модельних умовах сопел, які формують струмись, для дослідження взаємодії макромолекул з гідродинамічним полем у зв'язку з можливістю експериментального вивчення особливостей процесу перфорації у контрольованих умовах.

На рис. 2 наведено результати, отримані з використанням лазерного доплерівського анемометра [22], що вказують на розвиток швидкості уздовж осі потоку водного розчину ПЕО у вхідній ділянці модельного сопла гідроперфоратора у безрозмірних координатах.

Для водного розчину ПЕО у докритичних режимах течії розподіл осьової швидкості прак-

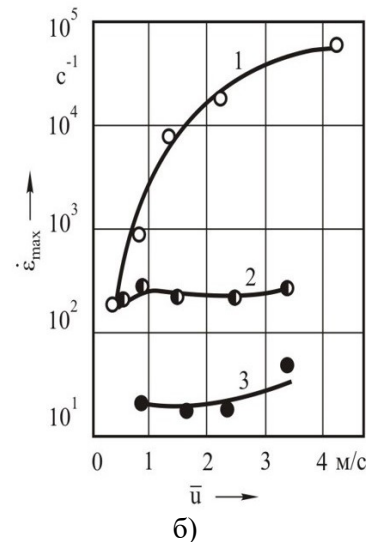
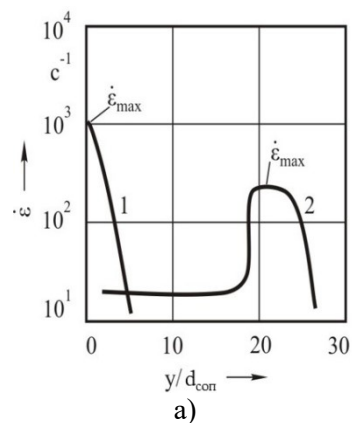
точно такий ж, як і у воді (крива 3 і точки 4). У закритичних режимах витікання спостерігається суттєва деформація кривих, що характеризують розвиток осевої швидкості (див. криві 1 і 2). Ці криві мають принаймні дві ділянки з лінійною зміною швидкості. Використовуючи розподіли швидкості на осі потоку водного розчину ПЕО у вхідній ділянці сопла, отримали розподіли їх градієнтів (рис. 3). Максимальний градієнт реалізується не на вході в мінімальний отвір сопла, а на деякій відстані від входу в цей отвір (крива 2 рис. 3,а). Величина  $\dot{\epsilon}_{\max}$  у вхідній ділянці сопла при течії водного розчину ПЕО є суттєво нижчою, ніж у потоці без добавок ПЕО, тобто дія гідродинамічного поля призводить до змін у розчині полімеру, які викликають перебудову поля швидкостей так, щоб зменшити поздовжні градієнти швидкості. Поздовжній градієнт швидкості на осі течії не перевищує  $30 \text{ c}^{-1}$ . Відзначається тенденція до пониження градієнта швидкості на осі течії зі зростанням молекулярної маси полімеру і його концентрації у розчині.



$M_{\text{PEO}} = 4 \cdot 10^6$ ,  $C_{\text{PEO}} = 0,05\%$ ;  
 1 –  $d_{\text{con}} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ,  $\bar{u} = 2,5 \text{ м/с}$ ;  
 2 –  $d_{\text{con}} = 0,37 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ,  $\bar{u} = 0,8 \text{ м/с}$ ;  
 3 – вода,  $d_{\text{con}} = 0,37 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ,  $\bar{u} = 0,8 \text{ м/с}$ ;  
 4 –  $C_{\text{PEO}} = 0,05\%$ ,  $d_{\text{нас}} = 0,37 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ,  $\bar{u} = 0,5 \text{ м/с}$

**Рисунок 2 – Розподіл швидкості на осі потоку водного розчину ПЕО у вхідній ділянці моделі струменеформуючого сопла гідроперфоратора**

Таким чином, розглянуті дані свідчать про особливості структури гідродинамічного поля у вхідній ділянці струменеформуючого сопла гідроперфоратора при течії крізь нього водного розчину ПЕО.



$d_{\text{con}} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ,  $M_{\text{PEO}} = 4 \cdot 10^6$ ;  
 а) 1 – вода, 2:  $C_{\text{PEO}} = 0,05\%$ ,  $\bar{u} = 0,8 \text{ м/с}$ ;  
 б) 1 – вода, 2 –  $C_{\text{PEO}} = 0,05\%$ ; 3 – на осі потоку розчину ПЕО,  $C_{\text{PEO}} = 0,05\%$

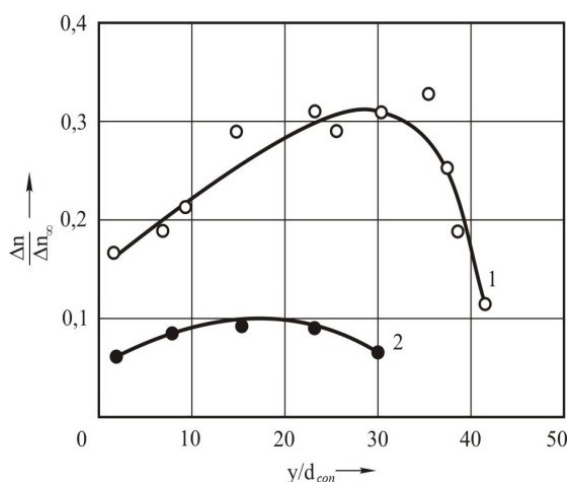
**Рисунок 3 – Розподіл градієнта швидкості на осі потоку у вхідній ділянці моделі струменеформуючого сопла гідроперфоратора**

Однією з найбільш суттєвих властивостей макромолекул ПЕО є їх власна анізотропія і анізотропія їх форми. Анізотропія форми враховується для полімерних систем, показник заломлення яких відрізняється від показника заломлення розчинника [14]. Тому, використовуючи поляризаційно-оптичну візуалізацію течій, а також вимірюючи подвійне променезаломлення водних розчинів ПЕО, можна отримати інформацію про локальні особливості деформації макромолекулярних клубків у вхідній ділянці струменеформуючого сопла.

Фотографії картин втікання водного розчину ПЕО в сопло, отримані у схрещених поляроїдах, свідчать про локалізацію подвійної променезаломлюючої зони поблизу осі потоку. Площини поляризації поляроїдів були орієнтовані під кутом  $45^\circ$  до осі потоку. Подвійне променезаломлення наростає, наближаючись до

зрізу (входу) сопла у випадку, коли середня швидкість течії дещо більша за критичне значення (рис. 3,а) і проходить через максимум при досить великих швидкостях течії (рис.3,б).

Результати, представлені на рис. 4, доводять можливість переходу до сильно розгорнутого стану макромолекулярних клубків в модельних умовах вхідної ділянки струменеформуєчого сопла. Відношення виміряного подвійного променезаломлення до гранично можливого досягає 0,35–0,46, що відповідає 60–70% ступеню розгорнутості макромолекулярних клубків. Зростання концентрації призводить до зменшення деформаційного чинника (див. рис.4, крива 2).



$M_{\text{PEO}} = 4 \cdot 10^6$ ; 1 –  $C_{\text{PEO}} = 0,03\%$ ,  $\bar{u} = 2,5$  м/с;  
2 –  $C_{\text{PEO}} = 0,1\%$ ,  $\bar{u} = 1$  м/с

**Рисунок 4 – Розподіл деформаційного фактору у вхідній ділянці модельного струменеформуєчого сопла гідро перфоратора для водних розчинів ПЕО**

Отримані дані переконливо доводять, що система «вода–полімер» в умовах течії крізь струменеформуєче сопло за певних режимів є саморегульованою з негативними зворотними зв'язками. Останнє проявляється у наступному: зростаючі поздовжні градієнти швидкості призводять до деформації макромолекулярних клубків, а це, у свою чергу, викликає перебудову структури потоку у вхідній ділянці струменеформуєчого сопла, так, щоб зменшити поздовжні градієнти швидкості. Останні не можуть бути нижчими деяких критичних значень  $\dot{\epsilon}_{кр}$ , достатніх для розгортання макромолекул.

Якщо вони все ж виявляються нижчими  $\dot{\epsilon}_{кр}$ , то ланцюги макромолекул полімеру згортатимуться і перестануть впливати на поле швидкостей. При цьому градієнт швидкості різко зростати-

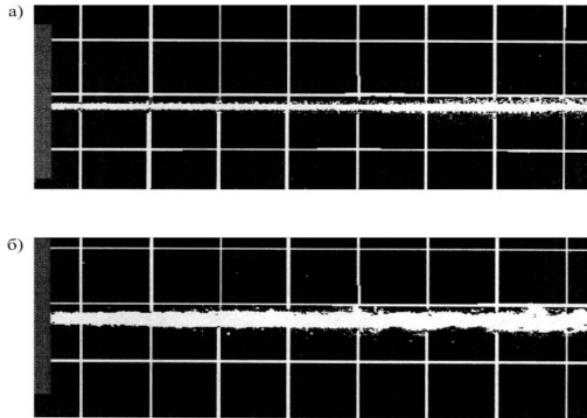
ме, а це призведе до суттєвої деформації макромолекулярних клубків, і все повториться знову. Тобто система «вода–полімер» сама вибирає такий мінімальний градієнт швидкості, який був би достатнім для розгортання макромолекулярних клубків полімеру. Зростання швидкості течії розчинів полімеру під впливом нелінійних ефектів призводить до незначного збільшення деформаційного чинника, але цього виявляється достатньо, щоб стабілізувати характерний градієнт швидкості для розчинів полімеру.

Отримані експериментальні дані (табл. 1–3) цілком пояснюються сильною деформаційною дією гідродинамічного поля на молекулярні клубки полімеру. Якщо обчислити поздовжній градієнт швидкості, що реалізується у конфузному соплі водомета (при течії ньютонівської рідини), то виявляється, що він не перевищував  $1,8 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ , тобто, не зважаючи на високі швидкості (250 м/с) і, отже, великі зсувні градієнти швидкості, умови деформації макромолекул полімеру в кінчному соплі водомета і у вхідній ділянці модельного сопла (з прямокутним входом) цілком порівнянні. Це вказує на те, що при течії розчину полімеру крізь сопло водомета макромолекули (як і у випадку із вхідною ділянкою модельного сопла), піддаються сильній деформаційній дії поздовжнього гідродинамічного поля, оскільки градієнти швидкості, що реалізуються при цьому, достатні для розгортання макромолекул.

Тому водополімерний струмінь, що виходить зі струменеформуєчого сопла, виявляється «армованим» сильно розгорнутими макромолекулярними ланцюгами полімеру. Частина енергії витрачається на структурну перебудову потоку [7], що і обумовлює зниження середньої швидкості струменя водного розчину полімеру (див. табл. 3). При цьому якість його формування покращується – струмінь з домішками полімеру компактніший (має менший діаметр), ніж водяний (рис.3, мішень 9 і рис. 5,а). Останнє сприяє збільшенню руйнівної здатності і, як наслідок, збільшенню граничної відстані, з якої ще відбувається руйнування сталеві мішені.

Дані дослідів, представлені в табл. 3 переконливо свідчать про те, що природа високої руйнівної здатності високошвидкісного струменя води з малими домішками полімеру не обумовлена ефектом Томса. Це підтверджується, насамперед, зниженням середньої швидкості струменя на 8–10% (похибка вимірів 1%) водного розчину ПЕО відносно швидкості водяного струменя за однакового робочого тиску

і діаметра сопла. Тобто, не зважаючи на зниження швидкості струменя водного розчину ПЕО, його руйнівна здатність значно вища за таку ж у водяного струменя.



а) розчин ПЕО,  $M_{\text{ПЕО}} = 6 \cdot 10^6$ ,  $C_{\text{ПЕО}} = 0,0013$  %;  
б) вода

**Рисунок 5 – Фотографії струменів розчину ПЕО і води, що витікають із сопла, яке формує струмінь**

Висновок про те, що природа високої руйнівної здатності високошвидкісного струменя води з малими домішками полімеру не обумовлена ефектом Томса, впливає також з наведеного нижче аналізу високошвидкісної турбулентної течії рідини. У разі пристінної турбулентності на її структуру повинні впливати сильно розгорнуті макромолекули [23, 24]. Для цього в турбулентному потоці повинні існувати певні умови, а саме: поздовжні градієнти швидкості і час деформації у них мають бути більшими  $\frac{0,5}{\theta_c}$  і  $\theta_c$  відповідно (де  $\theta_c$  – час релаксації розчину полімеру). За деяких досить високих динамічних швидкостей, коли утворення зон із розтягом та їх руйнування відбуваються з високою частотою, як впливає з роботи [25], збільшення швидкості деформації повинне призводити до пониження деформаційного чинника за рахунок зменшення часу дії поздовжнього градієнта швидкості. Останнє обумовлене дрібномасштабною турбулентністю, внесок якої різко зростає за високих динамічних швидкостей [25,26]. Значно зменшує ефект Томса за високих швидкостей і деградація розчинів полімерів [27], тому у високошвидкісних турбулентних потоках гідродинамічна активність полімеру повинна знижуватися як через невідповідність характерних часів релаксації розчину полімеру і часового масштабу течії (викидів), так і внаслідок деградації макромолекул.

## Висновки

1. Отримані експериментальні дані свідчать, що процес водополімерної перфорації свердловин, на відміну від перфорації струменем води або гідропіскоструйним струменем, має свої особливості.

2. З'ясовано механізм високої руйнівної здатності високошвидкісного струменя водного розчину полімеру, що полягає в руйнівній дії динамічного тиску водополімерного струменя, «армованого» сильно розгорнутими макромолекулярними ланцюгами у вхідній ділянці сопел гідроперфоратора, які формують високошвидкісний гідрострумінь.

3. Встановлена природа високої руйнівної здатності струменя розчину полімеру має важливе значення для виявлення раціональних режимів течії і розроблення оптимальних конфігурацій сопел гідроперфоратора та визначення його максимальної продуктивності. Експериментальна апробація запропонованого [28] способу перфорації свердловин високошвидкісним струменем водного розчину поліетиленоксиду підтвердила практичну і економічну доцільність його використання.

## Література

1. Чорний М.І., Чорний О.М., Метошоп І.М., Кузів І. М. Геологічні основи розкриття і випробування продуктивних пластів. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2013. 306 с.
2. Pogrebnyak V.G., Naumchik N.V. Hydrodynamic activity of polymer sinhigh-velocity flows. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 1995. Vol. 68, No.1. P. 138–140.
3. Pogrebnyak V.G., Chudyk I.I., Perkun I.V. High-efficiency Casing Perforati on Oil and Gas Wells. *SOCAR Proceedings. Reservoir and Petroleum Engineering*. 2021. No.2. P. 112 –120.
4. Погребняк А. В. Науково-теоретичні основи процесу різання харчових продуктів водополімерним струменем та розробка обладнання для його реалізації: дис. ... докт. техн. наук:05.18.12 – процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв / ХДУХТ. Харків, 2018. 272 с.
5. Дымент О.Н., Казанский К. С., Мирошников А. М. Гликоли и другие производные окисей этилена и пропилена. Москва: Химия, 1976. 374 с.
6. Brestkin Yu. V. Dynamic coil–extended chain phase transition in the longitudinal field. *Acta Polymerica*, 1987. Vol. 38, No.8. P. 470–477.
7. Ivanyuta Yu. F., Pogrebnyak V.G., Naumchuk N.V., Frenkel' S.Ya. Flow structure of aqueous solutions of polyethylene oxide in the



inletregion of short capillaries. *Journal of Engineering Physics*. 1985. Vol. 49, No.4. P. 1192–1197.

8. Пилюпенко В. Н. Влияние добавок на пристенные турбулентные течения. *Итоги науки и техники. Сер. Механика жидкости и газа*. Москва: ВИНТИ, 1985. №15. С. 156–257.

9. Кузьмин Р. А., Тихомиров Р. А., Кравченко Д. В. О преимуществах гидрорезания материалов струей жидкости с добавками водорастворимых полимеров. *Аэрокосмические технологии и образование на рубеже веков: Материалы Всероссийской научно-технической конференции*. Рыбинск: РГАТА, 2002. Ч. 2. С. 53–54.

10. Новейшие методы исследования полимеров / под ред. Ки Б. М. Москва: Мир, 1966. 571 с.

11. Цветков В. Н., Эскин В. Е., Френкель С. Я. Структура макромолекул в растворах. Москва: Наука, 1964. 719 с.

12. Тагер А. А., Вшивков С. А., Приданников Н. А. *Высокомолекулярное соединение*. Сер. А, 1979. Т. 21, № 3. С. 566 – 572.

13. Цветков В. Н. Жесткоцепные полимерные молекулы. Л.: Наука, 1986. 379 с.

14. Бресткин Ю. В., Агранова С. Ф., Дьякова Н. Е., Погребняк В. Г. Эффекты ДЛП полимерных растворов в продольных гидродинамических полях. *Высокомолекулярное соединение*. Сер. Б, 1989. Т. 31, № 11. С. 844–846.

15. А.с. 983377, СССР. G–01 N 11/06. Активированный теплоноситель / Погребняк В. Г., Иванюта Ю. Ф., Наумчук Н. В., Максютенко С. Н. № 330110, Бюл. № 47. 1982.

16. Pogrebnyak Volodymyr, Chudyk Igor, Pogrebnyak Andriy, Perkun Iryna Perforation of oil and gas wells by a high-velocity jet of polymer solution. *Nafta-Gaz*, 2022. No. 01. P. 3–13.

17. Атанов Г. А. Гидроимпульсные установки для разрушения горных пород. Киев: Вища школа, 1987. 152 с.

18. Бреннер В. А., Жабин А. Б., Пушкарев А. Е., Щеголевский М. М. Гидроструйные технологии в промышленности. *Гидромеханическое разрушение горных пород*. Москва: Акад. горных наук, 2000. 343 с.

19. Кузьмин Р. А., Тихомиров Р. А., Кравченко Д. В. О преимуществах гидрорезания материалов струей жидкости с добавками водорастворимых полимеров. *Аэрокосмические технологии и образование на рубеже веков: Материалы Всероссийской научно-технической конференции*. Рыбинск: РГАТА, 2002. Ч. 2. С. 53–54.

20. Кудин А. М. О раз мерах ассоциатов в растворах полимеров, снижающих гидродинамическое сопротивление. *Гидромеханика*. Респ. межвед. техн. сб. Киев: Наук. думка, 1972. Вып. 20. С. 82–87.

21. Погребняк А. В. Высокоэффективное гидрорезание твердых пищевых продуктов и материалов. *Управление реологическими свойствами пищевых продуктов*. Москва: МГУПП, 2008. С. 173–179.

22. Клочков В. П., Козлов Л. Ф., Потыкевич И. В., Соскин М. С. Лазерная анемометрия, дистанционная спектроскопия и интерферометрия: справочник / под ред. Соскина М. С. Киев: Наук. думка, 1985. 759 с.

23. Pogrebnyak V., Kryvenko G., Pogrebnyak A., Perkun I. 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.

24. Pogrebnyak V.G., Ivanyuta Yu.F., Naumchuk I.V. Unrolling of macromolecules under the conditions of wall turbulence. *Journal of Engineering Physics*, 1991. Vol.61, No.6. P.1475–1477.

25. Cantwell B. I. Organized motion in turbulent flow. *Ann. Rev. Fluid. Mech.*, 1981. No. 13. P. 457–519.

26. Брэдшоу П. Введение в турбулентность и ее измерение. Москва: Мир, 1974. 278 с.

27. 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.

28. Спосіб гідро струминної перфорації свердловин: пат. на корисну модель № 150245, Україна. МПК (2022.01) E21B43/00 E21B 43/14 (2006.01) / Погребняк В. Г., Погребняк А. В., Перкун І. В., Шиманський В. Я. – № у 2021 04406, заявл. 29.07.2021, опубл. 19.01.2022. Бюл. № 3. 4 с.

## References

1. Chorny M. I., Chorny O. M., Metoshop I. M., Kuziv I. M. Neolohichni osnovy rozkryttia i vyprovuvannia produktyvnykh plastiv. Ivano-Frankivsk: IFNTUNH, 2013. 306 p. [in Ukrainian]

2. Pogrebnyak V.G., Naumchik N.V. Hydrodynamic activity of polymer in high-velocity flows // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 1995. Vol. 68, No.1. P. 138–140.

3. Pogrebnyak V.G., Chudyk I.I., Perkun I.V. High-efficiency Casing Perforation on Oil and Gas Wells // *SOCAR Proceedings. Reservoir and Petroleum Engineering*. 2021. No.2. P. 112–120.

4. Pohrebniak A. V. Naukovo-teoretychni osnovy protsesu rizannia kharchovykh produktiv vodopolimernym strumenem ta rozrobka obladnannia dlia yoho realizatsii: dys. ... dokt. tekhn. nauk: 05.18.12 – protsesy ta obladnannia kharchovykh, mikrobiolohichnykh ta farmatsevtich-

- nykh vyrobnytstv / KhDUKhT. Kharkiv, 2018. 272 p. [in Ukrainian]
5. Dyiment O.N., Kazanskiy K. S., Miroshnikov A. M. Glikoli i drugie proizvodnyie okisey etilena i propilena. Moskva: Himiya, 1976. 374 p. [in Russian]
  6. Brestkin Yu. V. Dynamic coil–extended chain phase transition in the longitudinal field // *Acta Polymerica*, 1987. Vol. 38, No.8. P. 470–477.
  7. Ivanyuta Yu. F., Pogrebnyak V.G., Naumchuk N.V., Frenkel' S.Ya. Flow structure of aqueous solutions of polyethylene oxide in the inlet region of short capillaries // *Journal of Engineering Physics*. 1985. Vol. 49, No.4. P. 1192–1197.
  8. Pilipenko V. N. Vliyaniye dobavok na pristenyie turbulentne techeniya // *Itogi nauki i tekhniki. Ser. Mekhanika zhidkosti i gaza*. Moskva: VINITI, 1985. No.15. P. 156–257. [in Russian]
  9. Kuzmin R.A., Tihomirov R. A., Kravchenko D. V. O preimuschestvah gidrorezaniya materialov struey zhidkosti s dobavkami vodorastvorimyyh polimerov. *Aerokosmicheskie tehnologii i obrazovanie na rubezhe vekov: Materialy Vserossiyskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii*. Ryibinsk: RGATA, 2002. Part. 2. P. 53–54. [in Russian]
  10. Noveyshie metodyi issledovaniya polimerov / pod red. Ki B. M. Moskva: Mir, 1966. 571 p. [in Russian]
  11. Tsvetkov V. N., Eskin V. E., Frenkel S. Ya. Struktura makromolekul v rastvorah. Moskva: Nauka, 1964. 719 p. [in Russian]
  12. Tager A. A., Vshivkov S. A., Pridannikov N. A. // *Vyisokomol. soed. Ser. A*, 1979. Vol. 21, No 3. P. 566 – 572. [in Russian]
  13. Tsvetkov V. N. Zhestkotsepynie polimernyye molekulyi. L.: Nauka, 1986. 379 p. [in Russian]
  14. Brestkin Yu. V., Agranova S. F., Dyakova N. E., Pogrebnyak V. G. Effekty DLP polimernyyh rastvorov v prodolnyh gidrodinamicheskikh polyah // *Vyisokomol. soed. Ser. B*, 1989. Vol. 31, No 11. P. 844–846. [in Russian]
  15. A.s. 983377, SSSR. G–01 N 11/06. Aktivirovannyiy teplonositel / Pogrebnyak V. G., Ivanyuta Yu. F., Naumchuk N. V., Maksyutenko S. N. // 330110, Byul. No 47. 1982. [in Russian]
  16. Pogrebnyak Volodymyr, Chudyk Igor, Pogrebnyak Andriy, Perkun Iryna Perforation of oil and gas wells by a high-velocity jet of polymer solution // *Nafta-Gaz*, 2022. No. 01. P. 3–13.
  17. Atanov G. A. Gidroimpulsnyie ustanovki dlya razrusheniya gornah porod. Kiev: Vischa shkola, 1987. 152p. [in Russian]
  18. Brenner V. A., Zhabin A. B., Pushkarev A. E., Schegolevskiy M. M. Gidrostruynyye tehnologii v promyishlennosti. Gidromekhanicheskoe razrusheniye gornah porod. Moskva: Akad. gornyyh nauk, 2000. 343p. [in Russian]
  19. Kuzmin R. A., Tihomirov R. A., Kravchenko D. V. O preimuschestvah gidrorezaniya materialov struey zhidkosti s dobavkami vodorastvorimyyh polimerov // *Aerokosmicheskie tehnologii i obrazovanie na rubezhe vekav: Materialy Vserossiyskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii*. Ryibinsk: RGATA, 2002. Ch. 2. P. 53–54. [in Russian]
  20. Kudin A. M. O razmerah assotsiatov v rastvorah polimerov, snizhayuschih gidrodinamicheskoe soprotivlenie // *Gidromekhanika. Resp. mezhved. tehn. sb.* Kiev : Nauk. Dumka, 1972. Vol. 20. P. 82–87. [in Russian]
  21. Pogrebnyak A. V. Vvisokoeffektivnoe gidrorezaniye tverdyyh pischevyyh produktov i materialov // *Upravleniye reologicheskimi svoystvami pischevyyh produktov*. Moskva: MGUPP, 2008. P. 173–179. [in Russian]
  22. Klochkov V. P., Kozlov L. F., Potyikevich I. V., Soskin M. S. Lazernaya anemometriya, distantsionnaya spektroskopiya i interferometriya: spravochnik / pod red. Soskina M. S. Kiev: Nauk. dumka, 1985. 759 p. [in Russian]
  23. Pogrebnyak V. , Kryvenko G., Pogrebnyak A., Perkun I. 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.
  24. Pogrebnyak V.G., Ivanyuta Yu.F., Naumchuk I.V. Unrolling of macromolecules under the conditions of wall turbulence // *Journal of Engineering Physics*, 1991. Vol.61, No.6. P. 1475–1477.
  25. Cantwell B. I. Organized motion in turbulent flow // *Ann. Rev. Fluid. Mech.*, 1981. No. 13. P. 457–519.
  26. Bredshou P. Vvedeniye v turbulentnost i ee izmereniye. Moskva: Mir, 1974. 278 p. [in Russian]
  27. 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.
  28. Sposib hidro strumynnoi perforatsii sverdlonyn: pat. Nakorysnu model № 150245, Ukraina. MPK (2022.01) E21V43/00 E21V 43/14 (2006.01) / Pohrebniak V. H., Pohrebniak A. V., Perkun I. V., Shymanskyi V. Ya. – № u 2021 04406, zaiavl. 29.07.2021, opubl. 19.01.2022. Biul. № 3. 4 p. [in Ukrainian]