

622.692.4 (043)  
Я64

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

**ЯНОВСЬКИЙ СЕРГІЙ РОМАНОВИЧ**



УДК 622.692.4

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕКАЧУВАННЯ НАФТИ  
З УРАХУВАННЯМ ЇЇ НЕНЬЮТОНІВСЬКИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ**

Спеціальність 05.15.13 – Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища

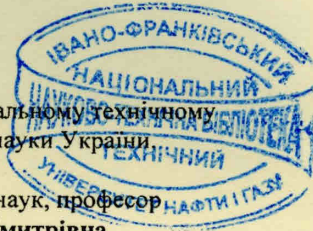
**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Івано-Франківськ – 2010

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу Міністерства освіти і науки України



**Науковий керівник:**

доктор технічних наук, професор  
**Середюк Марія Дмитрівна**,  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, завідувач кафедри транспорту і зберігання нафти і газу.

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор **Тимків Дмитро Федорович**,  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
завідувач кафедри інформатики (м. Івано-Франківськ);

кандидат технічних наук, доцент **Венгерцев Юрій Олександрович**,  
Міжнародний науково-технічний університет ім. Ю. Бугая,  
завідувач кафедри транспортування і зберігання нафти і газу, (м. Київ).

Захист відбудеться « 7 » липня 2010 року о 9<sup>00</sup> на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 20.052.04 в Івано-Франківському національному університеті нафти і газу, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна

З дисертацією і матеріалами до неї можна ознайомитися в бібліотеці Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу за адресою: 76019, Україна

Автореферат розміщений на сайті університету за адресою: [www.ifnua.edu.ua](http://www.ifnua.edu.ua)

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради Д 20.052.04  
канд. техн. наук



**АГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ**

**Актуальність теми.** Світова тенденція до зростання обсягів споживання нафти спонукала не тільки до пошуку нових нафтоносних провінцій, але і до збільшення частки високов'язких нафт у паливному балансі багатьох країн. Крім того, з кожним роком поглиблюється відбір легких фракцій при переробці нафт, що призводить до підвищення в'язкості нафтових залишків. У зв'язку з цим загострюється проблема транспортування високов'язких нафт і нафтопродуктів. Для здійснення трубопровідного транспортування в'язких і швидкозастигаючих парафіністих вуглеводнів необхідно реалізувати спеціальні технології, скеровані на покращання їх реологічних характеристик і зменшення гідравлічного опору. З метою зменшення енерговитратності транспортування високов'язких вуглеводнів використовують різні технології: перекачування попередньо підігрітих рідин, перекачування термооброблених рідин; перекачування сумішей високов'язких та малов'язких рідин; перекачування рідин, оброблених депресаторами тощо. Всі зазначені спеціальні технології перекачування вуглеводнів пов'язані зі значними витратами теплової енергії на їх підігрівання, а також з додатковими витратами ресурсів - депресаторів або розріджувачів. Враховуючи пріоритетність ресурсоенергозбереження для економіки України, особливої актуальності набуває удосконалення технології трубопровідного транспорту високов'язких нафт, насамперед, з точки зору зменшення енерговитратності перекачування. Вирішенню цієї важливої наукової задачі стосовно технології перекачування з підігрівом високов'язкої долиньської нафти присвячена дисертаційна робота.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалась відповідно до положень «Енергетичної стратегії України на період до 2030 р.», схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України, № 145-р від 15.03.2006 р; плану науково-дослідних робіт «ВАТ Укртранснафта», сформованого на виконання зазначеного розпорядження; та госпдоговірних НДР «Оптимізація витрат теплової енергії при транспортуванні нафти по нафтопроводу Долина-Дрогобич» (№ держреєстрації 0107U003776, 2007 р.), і «Розробка методики оптимізації витрат теплової енергії при транспортуванні нафти по нафтопроводу Долина – Дрогобич» (№ держреєстрації 0108U010004, 2008-2009 рр.), у виконанні якої автор приймав безпосередню участь.

**Мета і задачі дослідження.** Удосконалення технології перекачування високов'язкої нафти шляхом урахування її ньютонівських властивостей при обґрунтованні температури підігріву та режиму експлуатації нафтопроводу.

Поставлена мета реалізується через вирішення таких задач:

- виявлення закономірностей впливу сезонних чинників та температури підігріву на реологічні характеристики та транспортабельні властивості високов'язких швидкозастигаючих долиньських нафт;
- удосконалення математичних моделей трубопровідної гідродинаміки рідин, що характеризуються в'язкопластичними властивостями;
- урахування особливостей течії нелінійнов'язкопластичних рідин на режимні та енергетичні параметри роботи трубопроводу;

- математичне моделювання взаємозв'язку температури підігріву ньютонівських рідин, їх реологічних характеристик, і теплогідрравлічних параметрів експлуатації неізотермічних трубопроводів;
- урахування одержаних закономірностей взаємозв'язку сезонних чинників, ступеня підігріву та реологічних особливостей долиньської нафти при обґрунтуванні температури її підігріву перед закачуванням у нафтопровід за технологічними та економічними критеріями.

**Об'єктом досліджень** є магістральні нафтопроводи України та транспортовані ними нафти, що характеризуються ньютонівськими властивостями.

**Предметом досліджень** є реологічні та термогідродинамічні процеси, що супроводжують рух високов'язких нафт у трубопроводах.

**Методи дослідження.** Обробка результатів лабораторних та промислових експериментів виконувалась з використанням методів статистичного аналізу. При розробці математичних моделей застосовані методи диференціального та інтегрально-го числення, які реалізовані у комп'ютерних програмах.

**Положення, що захищаються.** Закономірності впливу сезонних чинників та температури попереднього підігріву на реологічні та термогідродинамічні параметри неізотермічного перекачування високов'язких нафт.

**Наукова новизна отриманих результатів.** У результаті виконання експериментальних та теоретичних досліджень вперше:

- встановлені закономірності впливу сезонних чинників на реологічні характеристики долиньської нафти у діапазоні робочих температур;
- виявлений і описаний аналітично суттєвий вплив температури підігріву перед закачуванням у трубопровід на реологічні характеристики долиньської нафти у широкому діапазоні робочих температур та градієнтів швидкості зсуву;
- встановлені границі використання реологічних моделей в'язкопластичних та нелінійнов'язкопластичних рідин для опису руху долиньської нафти у трубопроводі;
- запропонований метод обґрунтування температури підігріву високов'язкої нафти перед закачуванням у трубопровід, що базується на врахуванні реологічних характеристик та особливостей гідродинаміки ньютонівських рідин.

Удосконалено:

- запропонована апроксимація рівняння Букінгема, яка забезпечує адекватне моделювання параметрів руху в'язкопластичної рідини для повного діапазону зміни відносного ядра потоку;
- ураховані особливості трубопровідної гідродинаміки рідини, що характеризується нелінійнов'язкопластичними властивостями.

**Практична цінність отриманих результатів:**

- одержані аналітичні залежності статичного напруження зсуву, граничного динамічного напруження зсуву та пластичної в'язкості від робочої температури та температури підігріву нафти для долиньської нафти, що перекачується нафтопроводом Долина-Дрогобич протягом кожного місяця року;

- створені методика та програмне забезпечення для прогнозування режимних та енергетичних параметрів роботи нафтопроводу при неізотермічному перекачуванні нафти з в'язкопластичними та нелінійнов'язкопластичними властивостями;

- з урахуванням одержаних закономірностей впливу сезонних чинників та ступеня підігріву долинської нафти на її реологічні характеристики розроблені та впроваджені у виробництво рекомендації щодо коригування температури підігріву та режиму роботи нафтопроводу Долина-Дрогобич;

- запропонована, захищена патентом України, нова технологія підігріву високов'язкої нафти, яка передбачає використання замість традиційних теплообмінників інфрачервоних підігрівачів, що характеризуються значно вищим коефіцієнтом корисної дії.

**Особистий внесок здобувача.** Основні положення та результати дисертаційної роботи одержані автором самостійно. В опублікованих роботах автором особисто:

- досліджені закономірності впливу сезонних чинників та температури підігріву долинської нафти на криві течії та величину граничного динамічного напруження зсуву і пластичну в'язкість долинської нафти [1,6];

- одержані математичні моделі для коригувальних коефіцієнтів збільшення гідравлічного опору нафтопроводу при перекачуванні рідини, що характеризується в'язкопластичними властивостями [2];

- розроблений метод прогнозування режимних параметрів трубопроводу при перекачуванні рідини, що характеризується в'язкопластичними властивостями [3];

- створена методологія врахування властивостей нелінійнов'язкопластичних рідин на результати гідравлічного розрахунку нафтопроводу [4];

- розроблена методика та програма оптимізації температури підігріву нафти за критерієм мінімальних витрат теплової та електричної енергії [5,7];

- запропонована нова технологія підігріву долинської нафти за допомогою інфрачервоних підігрівачів [8].

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертації доповідались та обговорювались на:

- II Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми хімотології», (м. Київ, 2008);

- V Міжнародній навчально-науково-практичній конференції «Трубопровідний транспорт-2009», (м. Уфа, 2009);

- Міжнародній науково-технічній конференції «Нафтогазова енергетика: проблеми та перспективи» (м. Івано-Франківськ, 2009).

У повному об'ємі результати досліджень доповідались на засіданні кафедри транспорту і зберігання нафти і газу ІФНТУНГ та науковому семінарі факультету нафтогазопроводів зазначеного університету.

**Публікації.** За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 8 друкованих праць, з яких 5 статей у фахових виданнях і один патент.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація викладена на 159 сторінках, складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, 40 рисунків, 21 таблиці, списку використаних джерел, який містить 104 найменування, і трьох додатків.

### **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У першому розділі наведений аналіз літературних джерел з питань удосконалення технології трубопровідного транспортування високов'язких вуглеводнів. Значий науковий доробок у створення наукових основ та удосконалення технології

трубопровідного транспорту високов'язких вуглеводнів внесли відомі вчені В.Г. Шухов, В.С. Яблонський, В.І. Чернікін, Л.С. Лейбензон, В.А. Юфін, М.В. Лур'є, В.І. Марон, В.Ф.Новосьолов, П.І. Тугунов, В.Е.Губін, А.А. Коршак та ін. В Україні науковими аспектами технології трубопровідного транспорту високов'язких вуглеводнів займалися К.Д. Фролов, М.Д. Середюк, С.С. Шнерх, М.П. Возняк, В.Т. Болонний, Л.Д. Пилипів та ін. Дослідження вітчизняних та закордонних учених довели, що більшість високов'язких нафт і нафтопродуктів у процесі транспортування трубопроводом за робочих температур проявляє неньютонівські властивості. Такі рідини характеризуються транспортабельними властивостями лише після руйнування структурної ґратки. Для них залежність динамічного напруження зсуву від градієнта швидкості зсуву представляє собою криву, яка не виходить з початку координат. Залежно від вигляду кривої течії рідини з неньютонівськими властивостями поділяються на нелінійно'язкопластичні, крива текучості яких описується реологічною моделлю Балклі-Гершеля, та в'язкопластичні, для опису кривої текучості яких використовують реологічну модель Шведова-Бінгама.

Реологічні моделі рідин безпосередньо пов'язані із закономірностями їх руху в трубопроводі, а отже з їх транспортабельністю. Наявність реологічної моделі дає можливість одержати вираз для розподілу швидкості по перерізу труби і визначити втрати тиску при транспортуванні рідини. Для в'язкопластичної рідини у результаті інтегрування рівняння течії одержане рівняння Букінгема, яке безпосередньо не можна використати для проведення технологічних розрахунків трубопроводів, оскільки воно не розв'язується в явному вигляді відносно втрат тиску.

Аналіз літературних джерел засвідчив, що вдосконалення технології трубопровідного транспорту високов'язких вуглеводнів, насамперед, пов'язано з розширенням і поглибленням знань щодо їх реологічних характеристик, які визначають транспортабельні властивості. Для вітчизняних високов'язких нафт основним способом впливу на реологічні характеристики з метою покращання їх транспортабельних властивостей є використання температурного чинника, тобто технології трубопровідного перекачування з попереднім підігрівом на насосно-теплових станціях.

Не дивлячись на значну кількість робіт, присвячених удосконаленню технології трубопровідного транспорту високов'язких та швидкозастигаючих вуглеводнів, низка важливих для теорії та практики питань не знайшла у них відображення. Переважна більшість методик теплогідрравлічних розрахунків нафтопроводів базується на використанні емпіричних залежностей, одержаних шляхом експериментальних досліджень реологічних характеристик високов'язких нафт російських та середньоазійських родовищ. Зазначені методики не можуть бути використані для прогнозування режимних параметрів транспортування високов'язких нафт вітчизняних родовищ. Наявні методики використовують для опису залежності реологічних параметрів рідини від температури недостатньо точні математичні моделі, наприклад, формулу Рейнольдса-Філонова. У більшості із них не враховується тепло тертя потоку і прихована теплота кристалізації парафіну. Не досліджений вплив сезонних чинників та температури підігріву на реологічні та транспортабельні властивості високов'язкої долиньської нафти. Відсутні методи наукового обґрунтування температури підігріву нафти, що характеризується неньютонівськими властивостями, ле-

ред закачуванням у трубопровід. Недостатньо розроблена методологія гідравлічно-го розрахунку трубопроводів при перекачуванні вуглеводнів, що характеризуються властивостями в'язкопластичних та нелінійнов'язкопластичних рідин. Стосовно в'язкопластичних рідин існуючі методи базуються на використанні наближених апроксимацій рівняння Букінгема, які справедливі у вузькому діапазоні зміни відносної величини ядра потоку. Стосовно перекачування нелінійнов'язкопластичних рідин методи прогнозування режимних та енергетичних параметрів роботи нафтопроводів практично відсутні. Аналіз літературних джерел дав можливість сформулювати задачі досліджень.

У другому розділі представлені результати експериментальних досліджень впливу сезонних чинників та температури підігріву на реологічні характеристики високов'язкої долинської нафти. Лабораторні дослідження впливу температури підігріву та робочої температури долинської нафти на її реологічні властивості проводились на ротаційному віскозиметрі PEOTECT-2 та універсальному ротаційному віскозиметрі Rheotest RN4.1. Це структурні ротаційні віскозиметри, які призначені як для визначення динамічної в'язкості ньютонівських рідин, так і для проведення ґрунтовних реологічних досліджень ньютонівських рідин.

Практика експлуатації нафтопроводу Долина-Дрогобич свідчить, що реологічні властивості долинської нафти не є стабільними, а мають сезонні тенденції зміни. Вони зумовлюються низкою причин, насамперед, пов'язаних зі сезонними особливостями технології видобутку зазначеної нафти. Це зумовило необхідність проведення реологічних досліджень долинської нафти у розрізі кожного місяця року.

Протягом 2007–2008 рр. щомісячно відбиралася проба долинської нафти, що перекачувалася нафтопроводом Долина-Дрогобич. Для кожної проби нафти проведено п'ять серій експериментів, яким відповідає температура підігріву 70 °С, 65 °С, 60 °С, 55 °С і 50 °С відповідно. Для кожної температури підігріву експериментально визначались реологічні характеристики проби долинської нафти спочатку при температурі підігріву, а далі – при менших робочих температурах із діапазоном 5 °С до мінімального значення 0 °С. Таким чином, для кожної місячної проби нафти проведено 49 реологічних експериментів, а у загальній кількості понад 500. Для кожного експерименту виконувався повний комплекс реологічних досліджень у широкому діапазоні зміни градієнта швидкості зсуву при прямому і зворотному ходах віскозиметра. За результатами математичної обробки дослідних даних для кожного значення температури підігріву і кожного значення робочої температури долинської нафти побудовані криві течії при незруйнованій та зруйнованій структурах та одержані коефіцієнти реологічної моделі Шведова-Бінгема, а саме граничне динамічне напруження зсуву  $\tau_0$  і пластична в'язкість  $\eta_{пл}$ . Приклади одержаних залежностей для травневої проби долинської нафти наведені на рис.1 і рис.2. Аналіз результатів реологічних експериментів засвідчив, що при температурах долинської нафти, вищих за 30 °С, граничне динамічне напруження зсуву коливається у межах від 1 Па до 2 Па і практично не залежить від температури підігріву нафти та робочої температури нафти. Така величина граничного динамічного напруження зсуву, як показали дослідження, практично не впливає на транспортабельні властивості нафти, а отже і на режим роботи нафтопроводу.

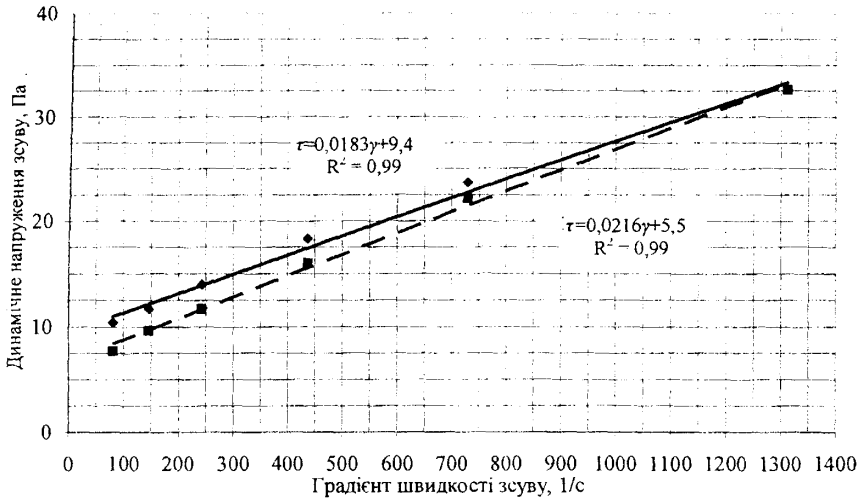


Рис. 1. Результати математичного моделювання реологічних характеристик долинської нафти при температурі 5 °С

(травнева проба нафти, температура підігріву 60 °С):

- ◆ - прямиий хід; ■ - зворотний хід; — лінійна модель (прямиий хід);
- лінійна модель (зворотний хід)

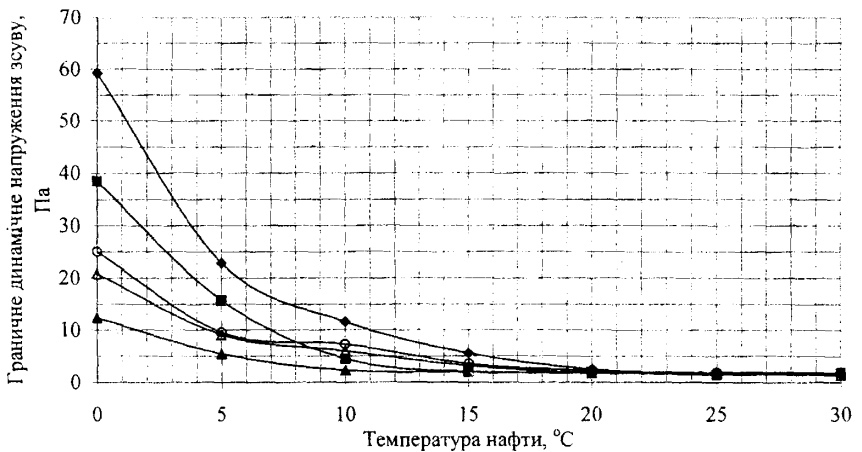


Рис. 2. Динаміка зміни залежності граничного динамічного напруження зсуву долинської нафти від температури при різних температурах підігріву (травнева проба нафти, зруйнована структура):

- ◆ - 70 °С; ■ - 65 °С; ▲ - 60 °С; Δ - 55 °С; ○ - 50 °С



Тому доцільно аналізувати динаміку зміни граничного динамічного напруження зсуву долинської нафти для температур, нижчих за 30 °С. Для проведення теплогідравлічних розрахунків нафтопроводу графічні реологічні характеристики долинської нафти необхідно представити у вигляді аналітичних виразів. Результати дослідження засвідчили, що при відомій температурі підігріву залежність граничного динамічного напруження зсуву долинської нафти від температури у діапазоні від 0 °С до 30 °С з максимальною похибкою 10 % можна описати поліноміальною функцією такого вигляду:

$$\tau_o = A \cdot t^3 + B \cdot t^2 + C \cdot t + D, \quad (1)$$

де  $A, B, C, D$ - коефіцієнти поліноміальної моделі залежності граничного динамічного напруження зсуву долинської нафти від температури.

Реологічні дослідження засвідчили, що для долинської нафти межею помітного прояву в'язкопластичних властивостей є температура 30 °С. Тому з метою виявлення впливу температури на пластичну в'язкість доцільно виділити два діапазони температур: перший від 0 до 30 °С та другий від 30 °С до заданої температури підігріву. Як засвідчили дослідження, для кожного зазначеного діапазону робочих температур долинської нафти при відомій температурі її підігріву залежність пластичної в'язкості від температури також може бути описана поліноміальною функцією вигляду (1). За результатами дослідів визначені числові коефіцієнти математичних моделей залежності граничного динамічного напруження зсуву і пластичної в'язкості від температури для кожної місячної проби нафти і кожного значення температури її підігріву. З метою аналізу впливу температури підігріву долинської нафти на її реологічні властивості за даними експериментів побудовані узагальнені графічні залежності граничного динамічного напруження зсуву і пластичної в'язкості від температури у діапазоні робочих температур для проб нафти, що перекачувалась щомісячно нафтопроводом Долина-Дрогобич (для травня одержані залежності наведені на рис. 3 і рис. 4). Аналіз графіків, побудованих для всіх місяців року, засвідчив, що величина температури підігріву долинської нафти за всіх інших однакових чинників суттєво впливає на її реологічні характеристики – величину динамічного напруження зсуву і пластичну в'язкість. Це спостерігається як для незруйнованої, так і зруйнованої структури долинської нафти.

Шляхом математичної обробки одержані узагальнені аналітичні вирази залежності граничного динамічного напруження зсуву і пластичної в'язкості від температури підігріву та температури, за якої вона перебуває в трубопроводі. Для травневої проби долинської нафти при незруйнованій її структурі у разі використання для опису залежності граничного динамічного напруження зсуву від температури формули (1) коефіцієнти моделі так залежать від температури підігріву:

$$A = -1,69 \cdot 10^{-7} t_{nio}^3 + 2,36 \cdot 10^{-5} t_{nio}^2 - 1,288 \cdot 10^{-3} t_{nio} + 2,840 \cdot 10^{-2}; \quad (2)$$

$$B = 5,92 \cdot 10^{-5} t_{nio}^3 - 9,204 \cdot 10^{-3} t_{nio}^2 + 4,824 \cdot 10^{-1} t_{nio} - 8,555; \quad (3)$$

$$C = -3,870 \cdot 10^{-3} t_{nio}^3 + 0,622 \cdot t_{nio}^2 - 33,073 \cdot t_{nio} + 581,0; \quad (4)$$

$$D = 6,662 \cdot 10^{-2} t_{nio}^3 - 10,862 \cdot t_{nio}^2 + 584,25 \cdot t_{nio} - 10326. \quad (5)$$

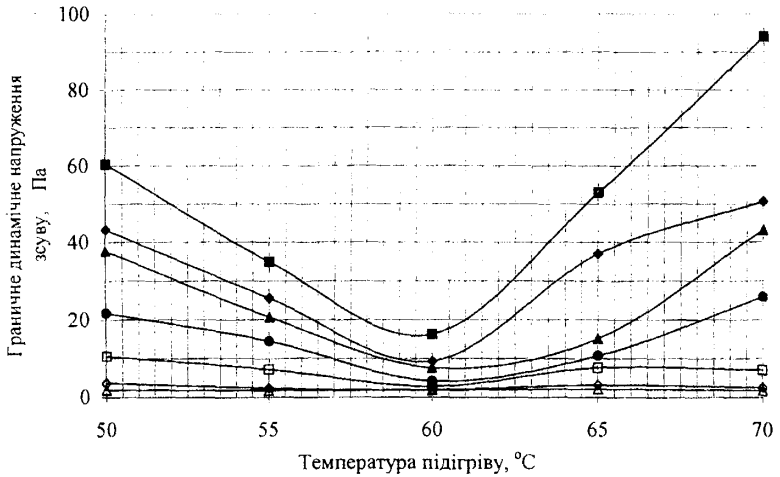


Рис.3. Залежність граничного динамічного напруження зсуву від температури підігріву долинської нафти у діапазоні робочих температур від 30 °C до 0 °C (травнева проба нафти, незруйнована структура):  
 ■- 0 °C; ◆- 5 °C; ▲- 10 °C; ●- 15 °C; □- 20 °C; ◊- 25 °C; △- 30 °C

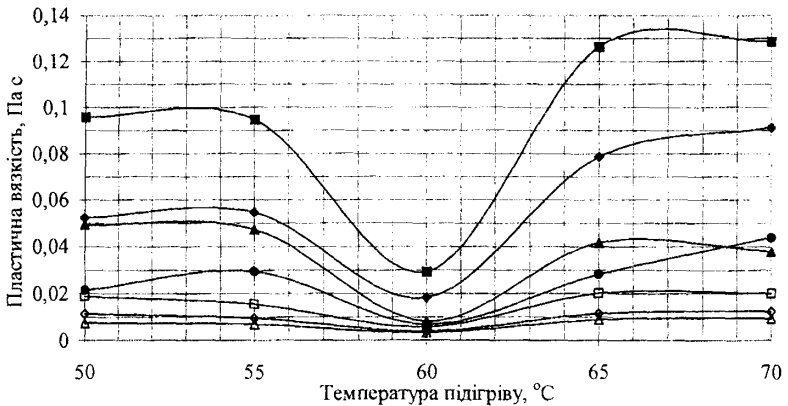


Рис.2. Залежність пластичної в'язкості від температури підігріву долинської нафти у діапазоні робочих температур від 30 °C до 0 °C (травнева проба нафти, незруйнована структура):  
 ■- 0 °C; ◆- 5 °C; ▲- 10 °C; ●- 15 °C; □- 20 °C; ◊- 25 °C; △- 30 °C

Аналогічні графічні та аналітичні залежності одержані для кожної усередненої місячної проби долинської нафти, що перекачувалась нафтопроводом Долина-Дрогобич. Відносно відхилення розрахункових та фактичних значень реологічних

характеристик долинської нафти не перевищує 10 %, що свідчить про можливість застосування розроблених моделей при розрахунках режимів експлуатації нафтопроводу Долина-Дрогобич. Аналіз засвідчив, що закономірності впливу величини температури підігріву на реологічні характеристики долинської нафти специфічні для кожного місяця, помітно відрізняються між собою. Це свідчить про нестабільність хімічного складу долинської нафти та наявність сезонних особливостей процесів її видобутку та підготовки до транспортування.

Оптимальною температурою підігріву ньютонівської нафти з точки зору найсприятливіших реологічних властивостей доцільно вважати температуру підігріву, якій відповідає комплекс мінімальних значень статичного напруження зсуву, граничного динамічного напруження зсуву і пластичної в'язкості. Результати оптимізації температури підігріву долинської нафти за вказаним критерієм такі: травень-червень 60 °С; липень-серпень 65 °С; вересень-жовтень 60-65 °С; листопад 60 °С; грудень 65-70 °С; січень – квітень 70 °С.

Знайдені значення температури підігріву долинської нафти є оптимальними лише з точки зору її реологічних характеристик, а не з точки зору транспортування нафтопроводом Долина-Дрогобич. Для знаходження оптимального значення температури підігріву долинської нафти з точки зору експлуатації нафтопроводу Долина-Дрогобич необхідно з урахуванням зміни сезонних умов ув'язати між собою реологічні характеристики нафти, теплогідралічні характеристики нафтопроводу, витрати на електроенергію при перекачуванні нафти і витрати на її підігрів на НПС Долина. Вирішення даної наукової задачі наведено у наступних розділах дисертації.

**Третій розділ** присвячений розробці методології трубопровідної гідродинаміки рідин, що характеризуються ньютонівськими властивостями. Експериментальні дослідження, виконані у розділі 2, засвідчили, що реологічна поведінка високов'язкої долинської нафти, окрім температурних чинників, помітно залежить від величини градієнта швидкості зсуву. При температурах, нижчих за 30 °С, і малих градієнтах швидкості зсуву долинська нафта проявляє властивості нелінійно-в'язкопластичної рідини, у той же час при значних градієнтах швидкості зсуву вона характеризується властивостями в'язкопластичної рідини. Запропонована удосконалена методологія апроксимації рівняння Букінгема, яка передбачає уведення у традиційні формули коригувальних коефіцієнтів, що дають змогу врахувати зростання гідралічного опору нафтопроводу через наявність у транспортованій рідині в'язкопластичних властивостей. Математичні моделі для коригувальних коефіцієнтів визначені шляхом спільного розв'язування рівнянь Дарсі-Вейсбаха і Букінгема. Коригувальний коефіцієнт збільшення гідралічного опору представлений як лінійна залежність від критерію Іллюшина, коефіцієнти якої є функцією числа Рейнольдса і пластичної в'язкості (рис. 5, 6, 7). За розробленими алгоритмом і комп'ютерною програмою одержані аналітичні вирази коефіцієнтів математичної моделі коригувального коефіцієнта  $K_{en}$  у широкому діапазоні чисел Рейнольдса і критерію Іллюшина. На відміну від існуючих робіт діапазон зміни бінгамівського числа Рейнольдса при розробці математичних моделей значно розширений і становить від 200 до 50000. Це відповідає фактичним режимам експлуатації нафтопроводу Долина-Дрогобич при перекачуванні долинської нафти.

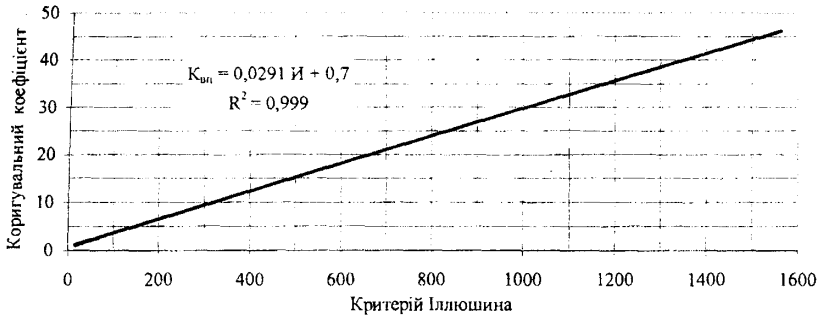


Рис. 5. Залежність коригувального коефіцієнта від критерію Іллюшина за турбулентного режиму ( $Re=8738$ , пластична в'язкість  $\eta_{пл}=0,02$  Па·с)

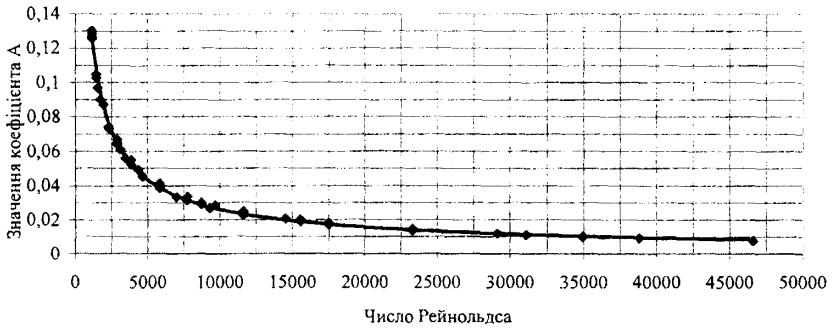


Рис. 6. Залежність коефіцієнта А від числа Рейнольдса у математичній моделі для коригувального коефіцієнта у разі перекачування в'язкопластичної рідини за турбулентного режиму

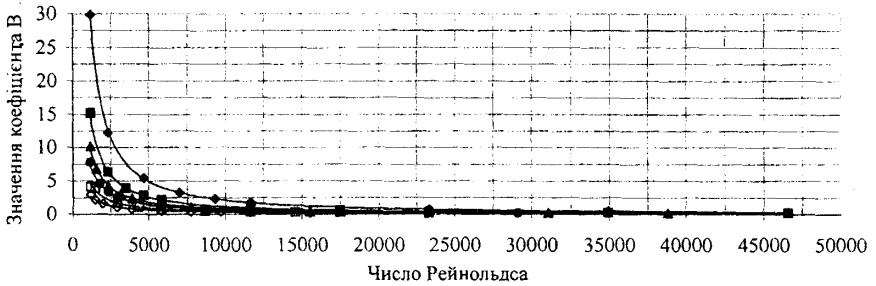


Рис.7. Залежність коефіцієнта В від числа Рейнольдса у математичній моделі коригувального коефіцієнта при перекачуванні в'язкопластичної рідини за турбулентного режиму:

◆ - 0,005 Па·с; ■ - 0,01 Па·с; ▲ - 0,015 Па·с; ● - 0,02 Па·с; □ - 0,04 Па·с; ◊ - 0,06 Па·с.

Шляхом математичного моделювання одержані такі залежності для коефіцієнтів моделі коригувального коефіцієнта за турбулентного режиму:

$$A = 22,68 \cdot Re^{-0,735}; \quad (6)$$

$$B = c_1 \cdot Re^{-c_2}; \quad (7)$$

$$c_1 = 45,31 \cdot \eta_{nl}^{-1,57}; \quad (8)$$

$$c_2 = -4912 \cdot \eta_{nl}^3 + 4911 \cdot \eta_{nl}^2 - 17,18 \cdot \eta_{nl} + 1,312. \quad (9)$$

Виконано математичне моделювання кривих текучості долинської нафти при робочих температурах нафти, нижчих за 30 °С, і малих градієнтах швидкості зсуву. Дослідження показали, що для зазначених умов реологічна поведінка долинської нафти описується моделлю Балклі-Гершеля зі значенням індексу текучості  $n=0,95$  (рис.8). Інші коефіцієнти реологічної моделі нелінійно'язкопластичної рідини залежать від сезону, температури підігріву та робочої температури нафти.

Аналогічно в'язкопластичній рідині розроблена методологія трубопровідної гідродинаміки нелінійно'язкопластичної рідини. Шляхом спільного розв'язування рівняння Дарсі – Вейсбаха та рівняння течії нелінійно'язкопластичної рідини одержані аналітичні вирази для коефіцієнтів лінійної залежності коригувальних коефіцієнтів збільшення гідравлічного опору нафтопроводу від критерію Іллюшина  $I$ , числа Рейнольдса  $Re$  і характеристики консистентності  $\varphi$  (рис. 9 і рис.10). Для ламінарного режиму вони мають вигляд

$$A = a_1 \ln Re + a_2, \quad (10)$$

$$B = b_1 \cdot Re^{-b_2}, \quad (11)$$

$$a_1 = 4,30 \cdot 10^{-2} \varphi + 1,64 \cdot 10^{-3}, \quad (12)$$

$$a_2 = -0,117\varphi + 0,115, \quad (13)$$

$$b_1 = 0,497 \cdot \varphi^{-1,3}, \quad (14)$$

$$b_2 = -1,5245 \cdot \varphi + 0,474. \quad (15)$$

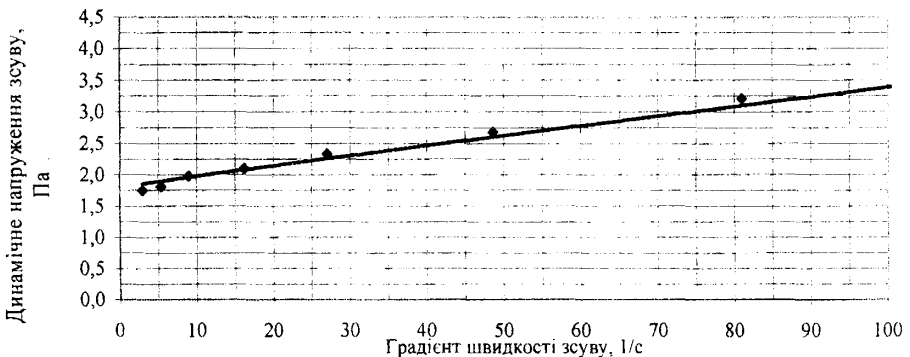


Рис.8. Залежність динамічного напруження зсуву від градієнта швидкості зсуву для долинської нафти, що перекачувалась у березні 2008 р., температура підігріву 70 °С, робоча температура 30 °С:

◆ - дослідні дані; — за формулою Балклі-Гершеля при  $n=0,95$

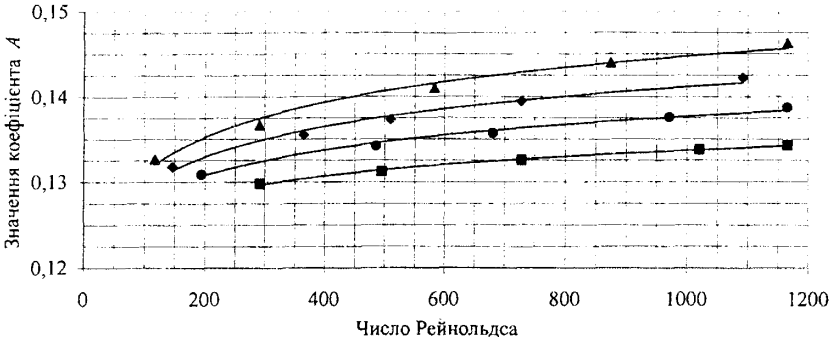


Рис.9. Залежність коефіцієнта  $A$  від числа Рейнольдса і коефіцієнта консистентності у математичній моделі коригувального коефіцієнта у разі перекачування нелінійно-в'язкопластичної рідини при ламінарному режимі:  
 ■— 0,06 Па·с; ●— 0,06 Па·с; ◆— 0,08 Па·с; ▲— 0,1 Па·с

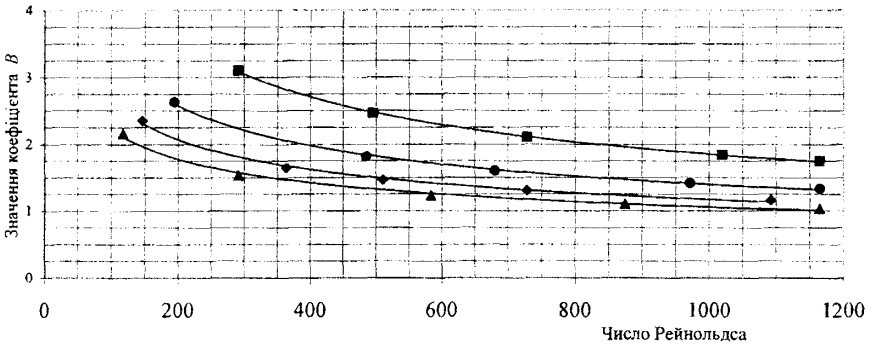


Рис.10. Залежність коефіцієнта  $B$  від числа Рейнольдса і коефіцієнта консистентності у математичній моделі коригувального коефіцієнта у разі перекачування нелінійно-в'язкопластичної рідини при ламінарному режимі:  
 ■— 0,04 Па·с; ●— 0,06 Па·с; ◆— 0,08 Па·с; ▲— 0,1 Па·с.

Таким чином, шляхом математичного моделювання одержані аналітичні вирази, які дають змогу при заданій витраті нафти та відомих реологічних властивостях неньютонівської рідини, не використовуючи метод ітерацій, визначити втрати тиску від тертя і тим самим достовірно прогнозувати режим роботи нафтопроводу. Перевагою запропонованого методу є те, що шляхом уведення коригувальних коефіцієнтів для гідравлічного опору залежно від режиму руху гідравлічний розрахунок нафтопроводу при перекачуванні неньютонівських рідин можна вести за традиційною методикою з використанням формули Дарсі-Вейсбаха. Це спрощує методологію гідравлічних розрахунків і дає змогу розробляти комп'ютерні програми для прогно-

зування теплогідрравлічних параметрів роботи нафтопроводів, що транспортують неньютонівські нафти.

**Четвертий розділ** містить результати реалізації розроблених математичних моделей реологічних та гідродинамічних моделей руху неньютонівських рідин по трубопроводу. Теоретичні та експериментальні дослідження засвідчили, що основним чинником, який визначає реологічні та транспортні властивості долинської нафти, є температура її підігріву перед закачуванням у трубопровід. Тому основним шляхом удосконалення технології перекачування долинської нафти є обґрунтування оптимальних за певними критеріями значень температури підігріву для кожного місяця року. На базі математичних моделей залежності реологічних характеристик долинської нафти від сезону, температури підігріву і робочої температури та результатів досліджень гідродинаміки в'язкопластичних і нелінійно-в'язкопластичних рідин розроблена методика прогнозування режиму роботи неізотермічного нафтопроводу. У методиці використані результати промислового експерименту щодо визначення діапазону сезонних змін повного коефіцієнта теплопередачі від нафти у навколишнє середовище для кожного місяця року. Передбачено застосування фактичних характеристики насосів НПС Долина, одержаних шляхом обробки статистичних даних режимів їх експлуатації.

У методиці використаний інтегральний метод визначення режимних та енергетичних параметрів роботи неізотермічного нафтопроводу. Наприклад, втрати тиску від тертя на ділянці нафтопроводу з неізотермічним турбулентним рухом в'язкопластичної рідини обчислюються числовим способом за формулою

$$\Delta P = \frac{8Q^2 \rho_{cp} L}{\pi^2 D^5 \text{Шу}} \int_{t_k}^{t_n} \frac{\lambda_n K_{en} dt}{t - t_o - t_\lambda K_{en}}, \quad (16)$$

де  $\rho_{cp}$  - середнє значення густини нафти на ділянці;  $L$  - довжина ділянки;  $D$  - внутрішній діаметр;  $t_n, t_k$  - температура нафти на початку та у кінці ділянки відповідно;  $\text{Шу}$  - параметр Шухова;  $\lambda_n$  - коефіцієнт гідравлічного опору для випадку перекачування ньютонівської рідини;  $t_\lambda$  - комплекс, що враховує тепло тертя потоку;  $t_o$  - температура ґрунту на глибині укладання труби.

Методика та обчислювальний алгоритм реалізовані у комп'ютерній програмі PROGNOZ, яка призначена для проведення теплогідрравлічного розрахунку неізотермічного нафтопроводу при перекачуванні нафти, що характеризується неньютонівськими властивостями. Програма написана на мові програмування Visual Basic і реалізована макросом у середовищі Microsoft Excel. За програмою PROGNOZ виконані багатоваріантні теплогідрравлічні розрахунки нафтопроводу Долина – Дрогобич для кожного місяця року і різних значень температури підігріву долинської нафти. У результаті визначені оптимальні за критерієм мінімальних питомих втрат тиску при транспортуванні долинської нафти значення температури її підігріву на НПС Долина: для умов січня 75 °С; для лютого - квітня 70 °С; для травня 60 °С; для червня 70 °С; для липня-серпня 65 °С; для вересня – жовтня 60 °С; для листопада – грудня 70 °С (рис.11).

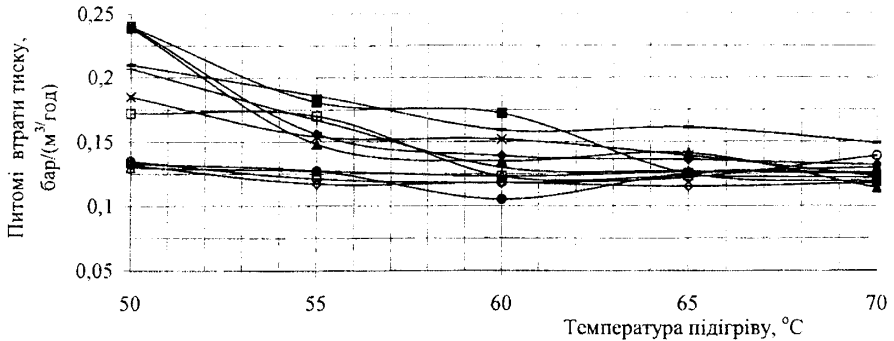


Рис.11. Залежність питомих втрат тиску від температури підігріву долинської нафти при її перекачуванні нафтопроводом Долина-Дрогобич:

— - січень; ■- лютий; ◆- березень; ▲- квітень; ●- травень; □- червень;  
 ◊- липень-серпень; △- вересень; ○- жовтень; + листопад; x – грудень.

Розрахунки показали, що для січня зниження температури підігріву до 65 °С призводить до того, що втрати тиску перевищують тиск, створений насосами НПС Долина. Для інших місяців мінімальні значення температури підігріву з точки зору забезпечення нормального режиму експлуатації нафтопроводу Долина-Дрогобич за значної вологості ґрунтів становлять: для лютого 65 °С; для березня 60 °С; для квітня-червня 55 °С; для листопада 60 °С; для грудня 65 °С.

Метод прогнозування режимних та енергетичних параметрів роботи неізотермічного нафтопроводу при перекачуванні нафти, що характеризується неньютонівськими властивостями, є основною частиною методики обґрунтування температури підігріву долинської нафти перед її транспортуванням нафтопроводом Долина-Дрогобич. Температура підігріву нафти знаходиться шляхом мінімізації функції

$$\bar{E}_{\text{за}} = 10^{-3} (\alpha \bar{W}_i + \bar{W}_e), \text{ МДж/т}, \quad (17)$$

де  $\alpha$  - співвідношення між вартістю одиниці теплової та електричної енергії

$$\alpha = \frac{\sigma_i}{\sigma_e}, \quad (18)$$

$\sigma_e$  - тариф на послуги тепlopостачання;  $\sigma_e$  - тариф на електроенергію для промислових споживачів;  $\bar{W}_i$  - питомі витрати енергії на підігрів нафти як відношення необхідної потужності пункту підігріву до масової витрати нафти у нафтопроводі;  $\bar{W}_e$  - питомі витрати енергії на перекачування нафти як відношення потужності, спожитої насосами, до масової витрати нафти у нафтопроводі.

За розробленою методикою виконано обґрунтування температури підігріву долинської нафти для кожного місяця року. Аналіз одержаних результатів засвідчив, що для періоду року з ускладненими кліматичними умовами (місяці січень - квітень, листопад, грудень) необхідне значення температури підігріву долинської нафти визначається не економічними, а технологічними аспектами, зазначеними вище.



Запропонована нова технологія підігріву високов'язкої долинської нафти перед закачуванням у трубопровід, яка відрізняється від існуючих тим, що нагрівання та підтримування необхідної температури нафти здійснюється керамічними інфрачервоними нагрівачами, які розміщують із зовнішньої бокової поверхні резервуара. Кількість і потужність інфрачервоних нагрівачів обирають залежно від необхідної температури нагріву та об'єму нафти у резервуарі. Ця технологія підігріву нафти, захищена патентом України, має технологічні, екологічні та економічні переваги, порівняно з існуючими аналогами. У ній реалізовані принципи енергозбереження, насамперед, за рахунок високого коефіцієнта корисної дії інфрачервоних нагрівників.

Результати дисертаційної роботи у вигляді методики та програмних продуктів передані для використання у ВАТ «Інститут транспорту нафти» (м. Київ). Очікуваний економічний ефект від впровадження рекомендацій щодо коригування температури підігріву долинської нафти для кожного місяця року з урахуванням її ньютонівських властивостей і сезонних чинників для нафтопроводу Долина-Дрогобич становить 130 тис. грн/рік. Рекомендації щодо змін температури підігріву і режимних параметрів роботи зазначеного нафтопроводу з травня 2008 року впроваджені в Дрогобицькому нафтопровідному управлінні. Фактичний економічний ефект склав 399 тис. грн у цінах вартості теплової енергії, зведених до травня 2007 р.

## ВИСНОВКИ

На основі теоретичних та експериментальних досліджень вирішена наукова задача удосконалення технології неізотермічного перекачування високов'язкої нафти шляхом урахування її ньютонівських властивостей при обґрунтуванні температури підігріву та режимів експлуатації нафтопроводу, а саме:

1 За результатами експериментальних досліджень встановлено, що для долинської нафти реологічні характеристики суттєво залежать від сезонних чинників, а також від температури підігріву перед закачуванням у трубопровід. При температурах, нижчих за 30 °С, і градієнтах швидкості зсуву, більших за 100 1/с, долинська нафта характеризується в'язкопластичними властивостями, а при менших градієнтах – нелінійнов'язкопластичними властивостями з усередненим значенням індексу текучості рідини 0,95.

2 Запропонована методологія гідродинаміки в'язкопластичної рідини, що передбачає апроксимацію рівняння Букінгема системою аналітичних виразів у широкому діапазоні чисел Рейнольдса та пластичної в'язкості, дає можливість достовірно прогнозувати режимні та енергетичні параметрів роботи нафтопроводу з урахуванням ньютонівських властивостей нафти при градієнтах швидкості зсуву, більших за 100 1/с.

3 Аналітичні вирази для коригувальних коефіцієнтів збільшення гідравлічного опору нафтопроводу, одержані шляхом спільного розв'язування формули Дарсі-Вейсбаха та рівняння течії нелінійнов'язкопластичної рідини, дають можливість урахувати ньютонівські властивості нафти при градієнтах швидкості зсуву, менших за 100 1/с.

4 Результатом математичного моделювання взаємозв'язку температури підігріву, реологічних характеристик та особливостей гідродинаміки в'язкопластичних і

нелінійнов'язкопластичних рідин є методика прогнозування режимних та енергетичних параметрів експлуатації неізотермічного нафтопроводу, яка уможлиблює наукове обґрунтування вибору температури підігріву, витрати та початкового тиску нафти з урахуванням її ньютонівських властивостей.

5 Обґрунтування температури підігріву нафти з ньютонівськими властивостями доцільно виконувати з використанням критерію мінімальних сумарних питомих витрат енергії на її підігрів та перекачування. Для умов експлуатації нафтопроводу Долина-Дрогобич рекомендовані значення температури підігріву долинської нафти становлять: для січня 75 °С; для лютого 70 °С; для березня 65 °С; для квітня-червня 60 °С; для липня-вересня 55 °С; для жовтня 60 °С; для листопада 65 °С; для грудня 70 °С. Впровадження нової технологія підігріву долинської нафти перед закачуванням у трубопровід з використанням керамічних інфрачервоних нагрівачів дасть змогу на 15 % зменшити енерговитратність її транспортування.

### Основний зміст роботи опубліковано у таких працях:

1 Яновський С.Р. Дослідження впливу температури підігрівання долинської нафти на її реологічні властивості/ С.Р. Яновський, М.Д. Середюк, Л.Д. Пилипів // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2008. - № 1(17).- С. 82-91.

2 Середюк М.Д. Гідрравлічний розрахунок нафтопроводу при перекачуванні нафти, що характеризується властивостями в'язкопластичної рідини/ М.Д. Середюк, С.Р. Яновський // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2008. - № 2 (27).- С. 56-61.

3 Яновський С.Р. Метод прогнозування режимних параметрів роботи нафтопроводу при перекачуванні в'язкопластичної нафти/ С.Р. Яновський, М.Д. Середюк // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2009. - № 1 (30). - С. 74-78.

4 Яновський С.Р. Особливості гідрравлічного розрахунку нафтопроводу, що транспортує нелінійнов'язкопластичну рідину/ С.Р. Яновський, М.Д. Середюк // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. -2009. - № 2(20). - С.89-96.

5 Яновський С.Р. Оптимізація температури підігріву долинської нафти перед транспортуванням її нафтопроводом Долина-Дрогобич/ С.Р. Яновський // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2009. – № 4 (33). – С. 92–95.

6 Середюк М.Д. Експериментальні дослідження впливу температури підігріву високов'язкої долинської нафти на її реологічні та транспортні властивості /М.Д. Середюк, С.Р. Яновський, Л.Д. Пилипів// Проблеми хімматології: Матеріали II Міжнарод. наук.-техн. конф. - К.:НАУ, 2008. – С. 333-341.

7 Середюк М.Д. Оптимизация температуры подогрева долинской нефти с учетом ее реологических свойств / М.Д. Середюк, С.Р. Яновский // Трубопроводный транспорт-2009: материалы V Междунар. учеб.-науч.-практ. конф.-Уфа: УГНТУ, 2009. - С.136-137.

8 Пат. 46954 України. МПК (2009), В65G 51/00, В65G 69/20. Спосіб перекачування високов'язких та застигаючих нафт / С.Р. Яновський, І.В. Короп, М.Д. Середюк, заявники і патентовласники Яновський С.Р., Короп І.В., Середюк М.Д. –№ u200907795: заявл. 24.07.2009. Бюл. №1, 2010.

## АНОТАЦІЯ

**Яновський С.Р.** – Удосконалення технології перекачування нафти з урахуванням її неньютонівських властивостей. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.15.13 - Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища. Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. - Івано-Франківськ, 2010.

У результаті експериментальних досліджень виявлені закономірності впливу сезонних чинників та температури підігріву на реологічні властивості високов'язкої швидкозастигаючої долинської нафти. Обґрунтовані границі застосування реологічних моделей Шведова-Бінгама і Балклі-Гершеля для опису реологічної поведінки долинської нафти в трубопроводі. Одержані аналітичні залежності граничного динамічного напруження зсуву і пластичної в'язкості від температури підігріву і робочої температури для кожного місяця перекачування.

Створена методологія трубопровідної гідродинаміки в'язкопластичних та нелінійнов'язкопластичних рідин. Вона передбачає спільне розв'язування формули Дарсі-Вейсбаха і відповідного рівняння течії рідини та одержання аналітичних виразів для коригувальних коефіцієнтів, які враховують збільшення гідравлічного опору нафтопроводу при перекачуванні рідини з неньютонівськими властивостями.

Розроблена методика прогнозування режимних та енергетичних параметрів нафтопроводу при неізотермічному перекачуванні рідини, що характеризується неньютонівськими властивостями. На її базі запропонований метод обґрунтування температури підігріву рідини з неньютонівськими властивостями за критерієм мінімальних сумарних питомих витрат енергії на її підігрів та перекачування.

Ключові слова: нафтопровід, нафтоперекачувальна станція, неньютонівська рідина, в'язкопластична рідина, нелінійнов'язкопластична рідина, температура підігріву, теплогідравлічний розрахунок.

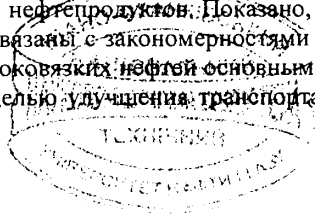
## АННОТАЦИЯ

**Яновский С.Р.** – Совершенствование технологии перекачки нефти с учетом ее неньютоновских свойств. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.15.13 - Трубопроводный транспорт, нефтегазохранилища. Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа. - Ивано-Франковск, 2010.

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, выводов, списка литературных источников и приложений.

В первом разделе приведен анализ работ по вопросам совершенствования технологии трубопроводного транспорта высоковязких и высокозастывающих нефтей и нефтепродуктов. Показано, что реологические модели жидкости непосредственно связаны с закономерностями ее движения в трубопроводе. Для отечественных высоковязких нефтей основным способом влияния на реологические характеристики с целью улучшения транспортных свойств является использование технологии



перекачки с предварительным подогревом. Анализ показал, что в имеющихся работах не исследовано влияние сезонного фактора и температуры подогрева на реологические характеристики нефти отечественных месторождений. Не до конца разработана методология трубопроводной гидродинамики нефти, характеризующейся вязкопластичными и нелинейновязкопластичными свойствами.

Второй раздел посвящен экспериментальным исследованиям реологических свойств долинской нефти. Исследования проведены для ежемесячных проб нефти, перекачиваемых нефтепроводом Долина-Дрогобыч с мая 2007 г. по апрель 2008 г. Для каждой пробы нефти рассматривались температуры подогрева 50 °С, 55 °С, 60 °С, 65 °С и 70 °С. Для каждой температуры подогрева реологические исследования проводились в рабочем диапазоне температур от температуры подогрева до 0 °С. В общей сложности выполнено свыше 500 экспериментов, по результатам которых построены кривые течения долинской нефти. Методом математического моделирования получены коэффициенты реологических моделей Шведова-Бингама и Балкли-Гершеля. Установлено, что реологические характеристики долинской нефти существенно зависят от температуры ее подогрева, а также от сезонного фактора. Для каждого месяца получены аналитические зависимости реологических характеристик долинской нефти от температуры подогрева и рабочей температуры в трубопроводе.

Третий раздел содержит результаты разработки методологии трубопроводной гидродинамики вязкопластичной и нелинейновязкопластичной жидкости. Путем совместного решения формулы Дарси-Вейсбаха и соответствующих уравнений течения получены аналитические выражения для корректирующих коэффициентов, учитывающих увеличение гидравлического сопротивления трубопровода при перекачке жидкостей с неньютоновскими свойствами. Математические модели охватывают области ламинарного и турбулентного течения высоковязкой жидкости, они дают возможность достоверно прогнозировать режим работы нефтепровода.

Четвертый раздел содержит результаты реализации математических моделей в вычислительных алгоритмах и программном обеспечении. На базе результатов экспериментальных и теоретических исследований разработана методика прогнозирования режимных и энергетических параметров работы нефтепровода при неизотермической перекачке нефти, обладающей неньютоновскими свойствами. Методика реализована в программном обеспечении. Программа использована для теплогидравлических расчетов нефтепровода Долина-Дрогобыч для каждого месяца перекачки долинской нефти при разных температурах ее подогрева. На базе полученных результатов выполнена оптимизация температуры подогрева долинской нефти при использовании в качестве критерия минимальных суммарных удельных затрат энергии на ее подогрев и перекачку. Результаты диссертационной работы в виде пакета методик и программ переданы для использования в «Институт транспорта нефти», (г. Киев). Ожидаемый экономический эффект от внедрения рекомендаций по оптимизации температуры подогрева долинской нефти с учетом ее неньютоновских свойств составляет 130 тыс. грн/год.

Ключевые слова: нефтепровод, нефтеперекачивающая станция, неньютоновская жидкость, вязкопластичная жидкость, нелинейновязкопластичная жидкость, температура подогрева, теплогидравлический расчет.

#### ANNOTATION

S.R. Yanovskyi – Improvement of Oil Pumping Technology with Allowance for Non-Newtonian Properties of Oil. – Manuscript

Thesis for PhD in Engineering, specialty 05.15.13 – Pipeline Transportation, Oil and Gas Storage.

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas. – Ivano-Frankivsk, 2010.

Regularities of influence of seasonal factors and preheat temperature on rheological properties of high-viscosity and high-wax oil from Dolyna oil field have been experimentally discovered. Limits of applying Shvedov-Bingham and Hershel-Buckley rheologic models to describe rheological behaviour of Dolyna oil in the pipeline have been substantiated. Analytic dependencies of ultimate dynamic shear stress and plastic viscosity on preheat and operation temperatures have been established for every month of oil pumping.

Pipeline fluid dynamics methodology has been developed for viscoplastic and nonlinearly viscoplastic fluids. The methodology provides for joint solution of Darcy-Weisbach formula and the corresponding fluid flow equation, and derivation of analytical expressions for adjusting factors, taking into consideration increase in piping friction caused by non-Newtonian fluid pumping.

A technique of forecasting pipeline operating conditions and energy parameters has been developed for non-isothermal pumping of non-Newtonian fluid. Following this technique, a preheat temperature substantiation method for non-Newtonian fluid has been suggested based on a criterion of minimum total specific power consumption for preheating and pumping.

*Key words:* oil pipeline, oil pumping station, non-Newtonian fluid, viscoplastic fluid, nonlinearly viscoplastic fluid, preheat temperature, thermohydraulic calculation.