

Міністерство освіти і науки України  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

**Слободян Назар Богданович**



УДК 622.691.4

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ТА ЗАХОДІВ ПІДВИЩЕННЯ  
ГІДРАВЛІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВІДІВ**

05.15.13 – трубопровідний транспорт, нафтогазосховища

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Івано-Франківськ – 2021

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  
**Грудз Володимир Ярославович**,  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, професор кафедри газонафтопроводів та газонафтосховищ.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент  
**Говдяк Роман Михайлович**,  
ТОВ «Інжинірингова компанія «Машекспорт»,  
генеральний директор;

кандидат технічних наук, доцент  
**Болонний Василь Тарасович**,  
Державний вищий навчальний заклад «Дрогобицький коледж нафти і газу», заступник директора з навчальної роботи.

Захист відбудеться 25 лютого 2021 р. о 14<sup>00</sup> на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 20.052.04 в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу за адресою: 76019, Україна, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

Із дисертацією можна ознайомитись в науково-технічній бібліотеці Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу за адресою: 76019, Україна, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

Автореферат розісланий «22» січня 2021 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради



А.П. Джус

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Газотранспортна система України містить 35 тисяч кілометрів лінійних ділянок газопроводів, термін експлуатації яких часто перевищує четверть століття. Внаслідок неефективного очищення і осушення газу перед транспортом і нераціональних режимів експлуатації систем газопостачання, коефіцієнт гідравлічної ефективності окремих ділянок системи знаходиться на низькому рівні. Це знижує пропускну спроможність системи, і, що особливо важливо в даний час, істотно підвищує витрати енергоносіїв на перекачування газу. У зв'язку з цим проблема підвищення ефективності газотранспортної системи України стає вельми актуальною.

Серед відомих і вживаних на практиці методів підвищення ефективності роботи газотранспортних систем найбільш ефективними і поширеними є методи очищення порожнини газопроводів із застосуванням очисних пристроїв. На теперішній час розроблено технічні засоби та технологію проведення процесу очистки. Однак, кожен газопровід, як об'єкт очистки, являє собою неповторний об'єкт, що вимагає індивідуального підходу до підвищення його ефективності. Слід мати на увазі різний характер розміщення рідинних скупчень по трасі і різноманітні їх властивості. Неврахування вказаних параметрів призведе до зниження ефективності очистки, що в свою чергу призведе до перевитрати енергоносіїв на транспортування газу. Тому в процесі оптимізації режимів очистки необхідно врахувати всі фактори, що мають вплив на підвищення ефективності. Це призведе до збільшення пропускної спроможності газопроводів та економії енергоресурсів на транспортування.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота носить науково-прикладний характер і входить в комплекс тематичних планів НАК «Нафтогаз України», спрямованих на підвищення надійності експлуатації та ефективності газотранспортного комплексу України, окреслених Національною програмою «Енергетична стратегія України на період до 2030 року».

**Мета роботи** полягає у вдосконаленні методів підвищення гідравлічної ефективності газопроводів і газотранспортних систем з врахуванням фізичних властивостей відкладень в порожнині труб при плануванні та оптимізації процесу очищення.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **завдання**:

- провести статистичний аналіз ефективності діючих газопроводів та існуючих методів її підвищення;
- розробити і реалізувати математичну модель процесу витіснення неньютонівської рідини твердим тілом з порожнини газопроводу з метою оптимізації процесу очищення;
- розробити методологію та провести теоретичні дослідження підвищення ефективності очистки газопроводів шляхом регулювання швидкості руху очисних пристроїв;

- провести теоретичні та експериментальні дослідження підвищення ефективності витіснення очисним пристроєм рідини з газопроводу шляхом аерації рідинних скупчень;

- розробити методику оптимізації періодичності очистки газотранспортних систем.

**Об’єктом дослідження** є гідравлічна ефективність системи магістральних газопроводів і методи її підвищення.

**Предметом дослідження** є вдосконалення методів підвищення гідравлічної ефективності роботи магістральних газопроводів.

**Методи дослідження.** Математичне моделювання руху очисних пристроїв, теорії узагальнених функцій, згладжування та диференціювання експериментальних даних, статистичні методи обробки інформації, сучасні комп’ютерні технології та їх реалізація. Вірогідність отриманих висновків підтверджено результатами дослідів та статистичними даними із застосуванням швидких алгоритмів обробки даних.

**Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що вперше:**

- запропоновано критерій для оцінки впливу зміни енергії газового потоку на гідравлічну ефективність газопроводів та газотранспортних систем;

- побудовано математичну модель процесу витіснення неньютонівської рідини твердим тілом з газопроводу, на основі реалізації якої підтверджено вплив фізичних властивостей відкладень на початковій ділянці газопроводу на процес очистки в цілому;

- здійснено оцінку зміни швидкості та встановлено закономірності руху очисного пристрою при зміні технологічної схеми магістрального газопроводу з метою підвищення ефективності очистки газопроводів;

- визначено закономірності впливу газового вмісту рідинних забруднень на величину перетоків через рухомиху границю очисного пристрою під час очистки магістрального газопроводу;

- отримано рівняння для оптимізації періодичності процесу очистки газотранспортних систем з метою забезпечення максимального значення гідравлічної ефективності.

**Практичне значення отриманих результатів.** Розв’язані в дисертації задачі, отримані результати і використані методи дають можливість підвищити коефіцієнт гідравлічної ефективності діючих газотранспортних систем залежно від властивостей рідинних скупчень та забезпечити високу ступінь очисток газопроводів шляхом аерації рідини та з врахуванням швидкості очисного пристрою.

Запропоновані методи розрахунку гідравлічної ефективності і технології очищення внутрішньої порожнини газопроводів можуть бути узагальнені і розвинені щодо газотранспортної системи України.

**Особистий внесок здобувача.** Безпосередньо автором:

- зібрано статистичний матеріал про ефективність роботи діючих газопроводів, зроблено аналіз існуючих методів їх підвищення [1-4];

- розроблена математична модель процесу витіснення неньютонівської рідини з трубопроводу твердим тілом [3];

- запропоновано технологію підвищення ефективності очистки газопроводів шляхом регулювання швидкості руху очисних пристроїв [4];
- досліджено технологію підвищення ефективності очистки газопроводів із застосуванням аерації рідинних скупчень [1];
- створено модель і методику оцінювання ефективності очистки трубопроводів в основу яких покладено забезпечення оптимальної швидкості руху очисного пристрою, особливо на початковій ділянці траси, яка розміщена після компресорної станції [3];
- запропоновано методику оптимізації періодичності очистки газотранспортних систем [2].

**Апробація матеріалів дисертації.** Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на міжнародних конференціях, зокрема: VI Міжнародній науково-технічній конференції «Нафтогазова енергетика 2017» до 50-річчя Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (Івано-Франківськ, 2016-2018), нараді фахівців НАК «Нафтогаз України» з питань науково-технічного співробітництва в галузі транспортування газу (Яремче, 2019 р.).

Результати дисертаційної роботи в повному обсязі доповідались і обговорювались на засіданні кафедри газонафтопроводів та газонафтосховищ і міжкафедральному науковому семінарі Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу в 2020 році.

**Публікації.** За темою дисертаційної роботи опубліковано 7 друкованих праць, з яких 1 – у міжнародному науковому фаховому журналі, 5 – у наукових фахових виданнях України, 1 – тези доповідей на міжнародній конференції.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота викладена на 135 сторінках машинописного тексту, складається із вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 2 додатків. Робота ілюстрована 10 таблицями та 25 рисунками. Список використаних джерел містить 107 найменувань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, наведено загальну характеристику роботи, сформульовано її мету й основні завдання досліджень. Викладено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів досліджень, а також особистий внесок автора в результати досліджень.

У **першому розділі** розглянуто роль Оператора ГТС України в енергетичному секторі та здійснено аналіз ефективності магістральних газопроводів та газотранспортної системи.

Гідравлічна ефективність характеризує темп старіння газопроводу і визначається ступенем зниження пропускної здатності газотранспортної системи.

Ефект від експлуатації ГТС визначається прибутком газотранспортного підприємства за рахунок різниці в цінах газу на початку і в кінці трубопроводу.

Збільшення обсягів перекачування газу призводило до зростання прибутку підприємства, тому підвищення гідравлічної ефективності здійснювалося з метою збільшення пропускної здатності. У час обмеження об'ємів перекачування збільшення прибутку підприємства можливе лише за рахунок зменшення затрат на транспорт, тобто зниження енергоефективності.

Для визначення коефіцієнта гідравлічної ефективності використана методика, що базувалась на математичних моделях стаціонарного руху газу в трубах. Розрахунки виконувались на основі вихідних даних, що відповідають стаціонарним режимам роботи газопроводу з врахуванням критерію нестационарності.

Визначено, що температура ґрунту в зоні проходження газопроводів змінюється в межах від 3,5 °С до 13,6 °С. Діапазон зміни температур на глибині закладення трубопроводу коливається від 8 % до 14 %. При цьому мінімум температури характерний для березня, а максимум для вересня. Це означає, що сезонні зміни температури слід враховувати при розрахунках ефективності роботи газопроводу. Неврахування сезонних змін температури ґрунту призведе до збільшення випадкової похибки у визначенні коефіцієнта гідравлічної ефективності згідно з розрахунками на 1,5 – 2 %.

Для складних ГТС з паралельним і послідовним з'єднанням ділянок визначення гідравлічної ефективності окремих ділянок принципово неможливе, оскільки розподіл витрати і гідравлічний опір паралельних газопроводів взаємно пов'язані. Тому задача стає невизначеною. Однак, в умовах неповного завантаження системи виникає можливість періодичного відключення окремих паралельних ділянок, міняючи конфігурацію системи. Використовуючи формули паралельного і послідовного з'єднання ділянок газопроводів із різними значеннями ефективності, можна отримати рівняння, що пов'язує коефіцієнти гідравлічної ефективності окремих ділянок з загальним коефіцієнтом гідравлічної ефективності ГТС. Змінюючи конфігурацію системи, можна отримати ряд таких рівнянь, в яких відомими будуть коефіцієнти гідравлічної ефективності ГТС різних конфігурацій, що дозволить визначити коефіцієнти гідравлічної ефективності окремих ділянок.

Ефективною в умовах неповного завантаження є також обернена задача, яка полягає в формуванні такої конфігурації ГТС, при якій гідравлічна ефективність буде максимальною, адже ряд ділянок з низькою ефективністю можна відключити.

На основі статистичних даних побудовані залежності ефективності газопроводів і газотранспортних систем від часу експлуатації. Фізичне пояснення різниці між характером зміни гідравлічної ефективності в часі для однопіткових газопроводів і газотранспортних систем в умовах їх неповного завантаження полягає в наступному: газотранспортні системи експлуатуються з великим недовантаженням, рідинні скупчення рівномірно розподілені між паралельними нитками. Гідравлічна ефективність в цей період зростає. Якщо завантаженість газотранспортних систем зростає, то це призведе до перерозподілу рідини між паралельними нитками. Із збільшенням відбору газу збільшуються лінійні швидкості потоків газу, що в свою чергу призведе до збільшення гідравлічного

опору, тобто до зменшення гідравлічної ефективності газотранспортних систем. Наступне зниження об'ємів транспорту газу переводить систему в початковий стан.

Коефіцієнт гідравлічної ефективності можна також характеризувати втратами енергії газу. А саме він вказує на зниження енергоємності замкненої системи (газового потоку), в результаті перетворення механічної енергії в теплову з наступними тепловтратами в навколишнє середовище.

З метою оцінки впливу зміни енергії газу на гідравлічну ефективність запропоновано критерій, який характеризує втрати внутрішньої енергії відносно механічної:

$$\Lambda = \frac{k(T_{cp} - T_{gp})}{C_p \cdot T_{cp} \cdot P_{cp}} w. \quad (1)$$

де  $P_{cp}$ ,  $T_{cp}$  – середні тиск і температура газу;

$T_{gp}$  – температура ґрунту;

$C_p$ ,  $k$  – теплоємність газу і коефіцієнт теплопередачі до ґрунту;

$w$  – середня по довжині й усереднена в часі швидкість руху газу.

Встановлено, що зростання параметру  $\Lambda$  приводить до зменшення коефіцієнта гідравлічної ефективності. При зростанні параметру  $\Lambda$  на 10 %, гідравлічна ефективність при цьому падає на 2,7 %. При великих лінійних швидкостях газу гідравлічна ефективність газопроводу росте. Це відбувається за рахунок «витирання» внутрішньої поверхні стінок труб потоком газу від наведеної шорсткості. При зниженні температури газового потоку знижується його внутрішня енергія, що в свою чергу веде до підвищення ефективності. Регресивний аналіз дозволив встановити критичне значення параметра  $\Lambda$  після якого ефективність починає зростати, він рівний  $10^{-10}$ .

**Другий розділ** присвячено дослідженням гідравлічної ефективності складних газотранспортних систем.

Коефіцієнт гідравлічної ефективності складної газотранспортної системи, що складається з кінцевого числа паралельних ниток із лупінгами і вставками, прийнято визначати відношенням пропускної здатності системи на даний момент експлуатації до її проектно (розрахункової) величини. У цьому плані розрахунки не викликають ніяких ускладнень. Проте на практиці експлуатації газотранспортних систем з метою оптимізації їх обслуговування потрібно визначити коефіцієнти гідравлічної ефективності не всієї системи в цілому, а кожної із паралельних ниток, що входять у систему, або ділянок цих ниток. У цьому плані виникають ускладнення, оскільки витрата газу вимірюється на практиці сумарною по всіх нитках системи, а для визначення коефіцієнтів ефективності кожній із ниток необхідно знати його розподіл між паралельними нитками. Відомо, що в паралельних системах газопроводів витрата між нитками розподіляється обернено пропорційно їх фактичному гідравлічному опору. Отже, для оцінки розподілу витрати між нитками необхідно знати фактичні значення коефіцієнтів гідравлічного опору кожної нитки, що є кінцевою метою визначення ефективності. Таким чином, задача визначення

коефіцієнтів гідравлічної ефективності паралельних систем газопроводів є фактично нерозв'язною. Необхідно мати додаткові умови, що давали б можливість оцінити розподіл витрати газу між паралельними нитками системи.

Аналізуючи рівняння стаціонарної течії газу в газопроводі шляхом нескладних перетворень одержано залежності, що зв'язують коефіцієнт гідравлічної ефективності системи в цілому з коефіцієнтами гідравлічної ефективності окремих її ділянок при паралельному і послідовному з'єднанні. Отримано рекурентні формули, які дозволяють визначити коефіцієнт гідравлічної ефективності довільної складної газотранспортної системи в умовах квазістаціонарного режиму, якщо відомі коефіцієнти гідравлічної ефективності кожної з її ділянок. Проте, практично важливою є обернена задача: визначити коефіцієнти гідравлічної ефективності кожної з ділянок, якщо відомий коефіцієнт гідравлічної ефективності системи. Ця задача є невизначеною, оскільки з одного рівняння, що представляє собою комбінацію рекурентних залежностей потрібно визначити скільки невідомих, скільки ділянок має система. Для усунення цієї невизначеності пропонується виконувати технологічні зміни системи транспорту газу шляхом відключення окремих ділянок і в цей період виконувати виміри, необхідні для розрахунків коефіцієнта гідравлічної ефективності системи. Якщо система складається з  $n$  лінійних ділянок, то необхідно виконати  $n-1$  технологічних переключень. Проте в моменти переключень буде виникати нестационарність протікання газу по газопроводі, що не дозволить визначити параметри для розрахунку коефіцієнтів гідравлічної ефективності системи на кожному технологічному переключенні. Очікувати тривалий період часу встановлення нового стаціонарного режиму також неможливо, тому що в процесі відключення деяких лінійних ділянок можливі перерозподіли рідини між ділянками, що залишилися в експлуатації, що призведе до зміни гідравлічної ефективності як окремих ділянок, так і системи в цілому. Тому виміри параметрів режимів необхідно вести в період перехідного процесу, а коефіцієнти гідравлічної ефективності системи на кожному технологічному переключенні визначати на основі нестационарних математичних моделей. Зазначене припущення може бути реалізоване і дозволить одержати достовірні результати тільки в тому випадку, якщо отримані співвідношення, а також заміна складної газотранспортної системи еквівалентним газопроводом, справедливі при нестационарному режимі.

Для розв'язку поставленої задачі виконувалося моделювання нестационарного процесу в системі газопроводів «Братерство», що представляє собою двохнитковий газопровід з перемичками. На першому етапі моделювання система представлялась у вигляді комбінованого з'єднання чотирьох лінійних ділянок, на кожній з яких коефіцієнт гідравлічної ефективності (а, отже, коефіцієнт гідравлічного опору) мав своє визначене значення. На другому етапі реальна система замінювалась еквівалентним газопроводом із діаметром, а загальний коефіцієнт гідравлічної ефективності визначався на основі отриманих співвідношень. На границях системи задавалися функції зміни тиску і температури (на початку) і масової витрати (в кінці), що відповідають змінам параметрів реального нестационарного процесу в системі. Результати математичного моделювання складної газотранспортної системи показують, що її заміна еквівалентним газопроводом при



квазіізотермічному режимі призводить до похибки у визначенні коефіцієнта гідравлічної ефективності, яка не перевищує 3,5 %.

Ряд дослідників некоректно ототожнюють коефіцієнт гідравлічної ефективності газопроводу з коефіцієнтом корисної дії (ККД). Зауважимо, що останній окрім гідравлічних втрат енергії на тертя в місцевих опорах, які виникають у вигляді рідинних скупчень, включає інерційні втрати енергії та дисипацію її в довкілля. Для оцінки величини дисипативних та інерційних втрат енергії проведено аналітичні дослідження нестационарних процесів на математичній моделі, побудованій на основі рівнянь руху газу, нерозривності та енергії. Результати у вигляді графіків подано на рисунку 1.

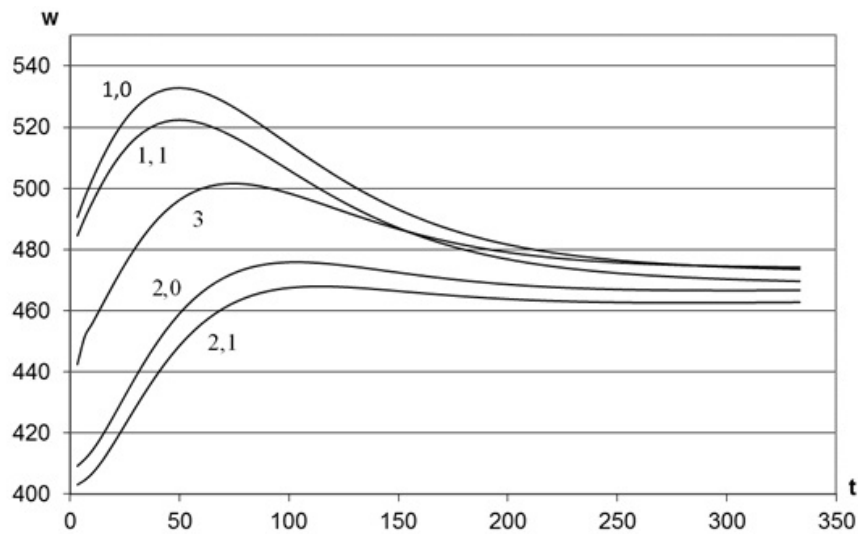


Рисунок 1 – Залежність початкової  $W(1_n)$ , кінцевої  $W(2_n)$  та усередненої  $W(3)$  витрат газу (кг/с) при нехтуванні ( $n=0$ ) та врахуванні ( $n=1$ ) дисипації енергії

Аналіз результатів моделювання показує, що неврахування інерційних та дисипативних втрат енергії при визначенні ККД лінійної ділянки газотранспортної системи призводить до похибки, яка лежить в межах 2 – 43 % в залежності від критерію нестационарності  $N_t$  (рисунок 2).

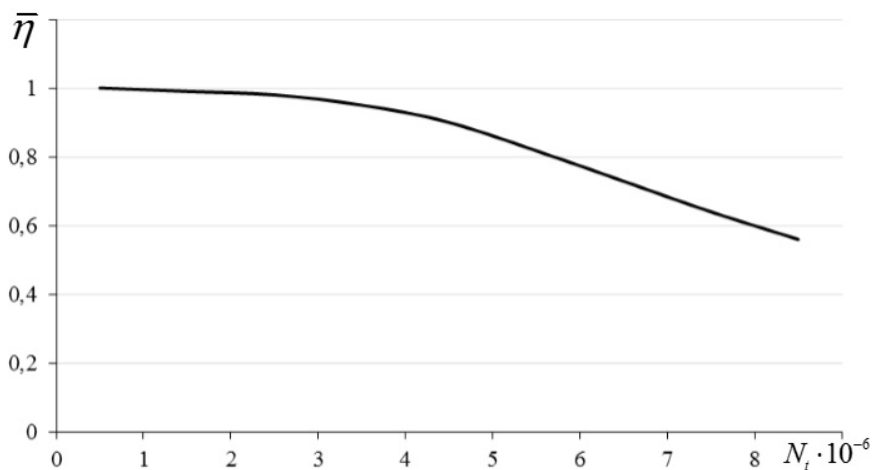


Рисунок 2 – Залежність ККД газопроводу від критерію нестационарності

Отже, між значеннями коефіцієнта гідравлічної ефективності газопроводу і коефіцієнта корисної дії можуть бути суттєві відмінності в залежності від режиму перекачування газу.

**Третій розділ** присвячено дослідженням удосконалення методів та заходів підвищення гідравлічної ефективності магістральних газопроводів та газотранспортних систем.

На основі розв'язку задачі руху неньютонівської рідини на початку ділянки круглої труби одержано рівняння, яке дає змогу побудувати характер розподілу швидкостей по перерізу потоку в залежності від лінійної координати.

Нерівномірність розподілу швидкостей по перерізу труби в області рідинної фази при витисненні її з трубопроводу твердим тілом, зумовлює виникнення зон підвищеного тиску в пристінному шарі рідини і пониженого в осьовому. Внаслідок цього виникають умови деформацій ущільнюючих елементів очисного пристрою і перетоку рідини в запоршневий простір. Властивості рідини, що витискується поршнем із трубопроводу, впливають як на характер розподілу швидкостей по перерізу труби, так і на величину перетоків через нещільності рухомої границі. Тому виникає необхідність враховувати властивості рідинних скупчень в процесі планування режиму очистки.

В результаті проведених досліджень було виявлено, що для знаходження оптимальної швидкості очисного пристрою при витисненні неньютонівської рідини потрібно використовувати поправочний коефіцієнт, який враховує реологічні властивості рідини, тобто

$$U_0^* = k \cdot U_0, \quad (2)$$

де  $U_0^*, U_0$  – відповідно оптимальна швидкість у випадку неньютонівських і ньютонівських властивостей рідини;

$k$  – поправочний коефіцієнт, який враховує реологічні властивості рідини.

Для визначення коефіцієнта  $k$  проводились дослідження процесу витиснення ньютонівської і неньютонівської рідини за допомогою математичної моделі при різних значеннях ступеня неньютонівської поведінки і різних значеннях відношення міри консистентності і в'язкості, а також різних відносних об'ємах рідини в трубопроводі. Обробка даних методами регресивного аналізу дала змогу одержати формулу для його визначення.

$$k = 0,743 \left( \frac{V_p}{V_{mp}} \right)^{-0,013} \left( \frac{\mu}{\alpha} \right)^{0,667} n^{0,25}, \quad (3)$$

де  $V_p, V_{mp}$  – відповідно об'єм рідини і трубопроводу;

$\mu, \alpha$  – відповідно динамічна в'язкість і міра консистентності;

$n$  – ступінь неньютонівської поведінки рідини.

Числовий аналіз показав, що відхилення швидкості очисного пристрою від оптимальної, в залежності від властивостей виштовхуваної рідинної пробки може досягати до 30 %, що в свою чергу веде до зменшення ефективності очистки газопроводу.

При очищенні газопроводів з пересіченим профілем траси важко витримати режим подачі газу в газопровід, при якому швидкість руху поршня була б сталою, чи, по крайній мірі, не виходила за межі допустимого інтервалу. При переході поршня з висхідної на несхідну ділянку траси сила гравітації викликає дію прискорення на рухомий поршень. Тому необхідно вжити заходів для гальмування руху поршня. До таких заходів можна віднести зміну технологічної схеми траси, яка призведе до зменшення витрати газу в магістралі і, як наслідок, до гальмування руху поршня. Якщо магістраль на необхідній ділянці має лупінг, який споруджується в основному для забезпечення надійності експлуатації, то його під'єднання до магістралі в момент, коли поршень перейде на низхідну ділянку, дозволить частину газу перепустити по лупінгу, що зменшить лінійні швидкості руху в магістралі і призведе до гальмування руху поршня.

Найбільш сильний вплив на ступінь зниження швидкості руху поршня має довжина лупінга. Із збільшенням довжини лупінга ступінь гальмування руху поршня зменшується. При збільшенні діаметру лупінга умови гальмування руху покращуються. Встановлено, що зменшення початкового і збільшення кінцевого тисків призводить до покращення умов гальмування. А також зменшення початкового тиску більш ефективно, ніж збільшення кінцевого тиску. При збільшенні перепаду тисків ступінь зменшення швидкості знижується, тобто умови гальмування покращуються.

Нехай при русі поршня по магістралі (рисунок 3) тиски на початку і в кінці траси склали відповідно  $P_n$  і  $P_k$ , а тиски в точках під'єднання лупінга –  $P_1$  і  $P_2$ . Перепад тисків на рухомій границі визначався різницею тисків  $\Delta P = P_+ - P_-$ .

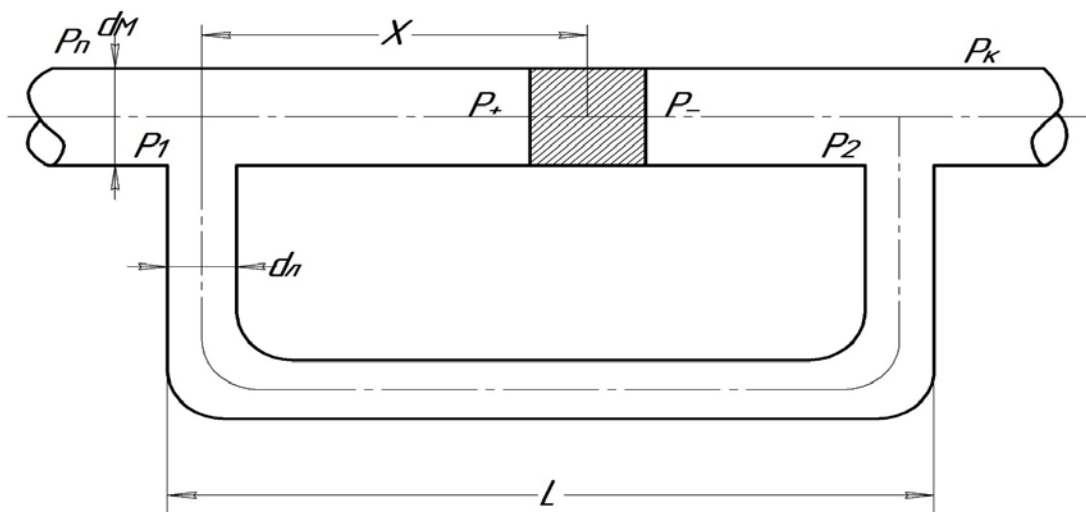


Рисунок 3 – Розрахункова схема

Використовуючи математичну модель стаціонарного руху газу, після нескладних перетворень для співвідношення масових витрат газу в магістралі до і після під'єднання лупінга одержимо

$$\frac{Q_M}{Q_{M0}} = \sqrt{\frac{L_0/L}{\varphi_L} \left\{ 1 + \frac{\chi_P}{P_n^2 - P_\kappa^2} + \sqrt{\left[ 1 + \frac{\chi_P \Delta P}{P_n^2 - P_\kappa^2} \right]} - \varphi_L \left[ 1 - \left( \frac{L_0}{L} - 1 \right) \frac{\chi_P \Delta P}{P_n^2 - P_\kappa^2} \right]^2 \right\}}, \quad (4)$$

де  $L$  – довжина лупінга;

$$\varphi_L = \frac{L_0}{L} \left( 4 \frac{L_0}{L} - 6 \right) + 3, \quad \chi_P = 2 \frac{ZRT}{UF_M} Q_M + \Delta P.$$

Одержане рівняння містить невідому масову витрату  $Q_M$  в правій і лівій частинах і в аналітичному вигляді розв'язане бути не може. Але воно легко може бути реалізоване методом ітерацій.

На основі викладеної методики розроблено алгоритм і складено програму розрахунку ступеня зменшення швидкості руху очисного поршня в залежності від роду технологічних параметрів та технічних характеристик поршня і газопроводу.

Очевидно, щоб зробити очищення більш ефективним, слід знизити різницю тисків до і після гідроудару, не знижуючи при цьому швидкості руху поршня. З метою зменшення величини перетікання через рухому границю під час витіснення рідини з трубопроводу поршнем необхідно зменшити модуль пружності рідини. Для цього пропонується насичувати рідину газом до утворення гомогенного двофазового середовища. Практична реалізація способу вимагає визначення раціонального газонасичення рідинних супчень і вибору шляху його практичної реалізації. Великою, що кількісно визначає об'єм перитікання у просторі за поршнем, є ступінь підвищення тиску в рідинній області, що виникає на границі з поршнем.

З графіків видно, що чим більше газонасичення рідинної пробки, тим менший градієнт тиску, і отже, менший тиск на очисний поршень чинить рідинна пробка. З плином часу тиск у рідинній області зростає. Це викликано постійним прискоренням поршня і нестисненням рідкої фази. Зі збільшенням газонасичення в рідкій фазі зростання тиску на поршень сповільнюється.

Для кількісної оцінки впливу газонасичення рідинної пробки на ступінь її взаємодії з очисним поршнем розраховано зміну тиску в рідкій фазі по довжині пробки і в часі. Передбачалося, що очисний поршень виштовхує ненасичену газом водяну пробку довжиною 1000 м з трубопроводу внутрішнім діаметром 1000 мм з прискоренням 2 м/с. Навіть розглядалися випадки, коли газовий вміст рідинних забруднень становить відповідно 70 % і 95 %. Результати розрахунків у вигляді графіків наведені на рисунках 4 і 5.

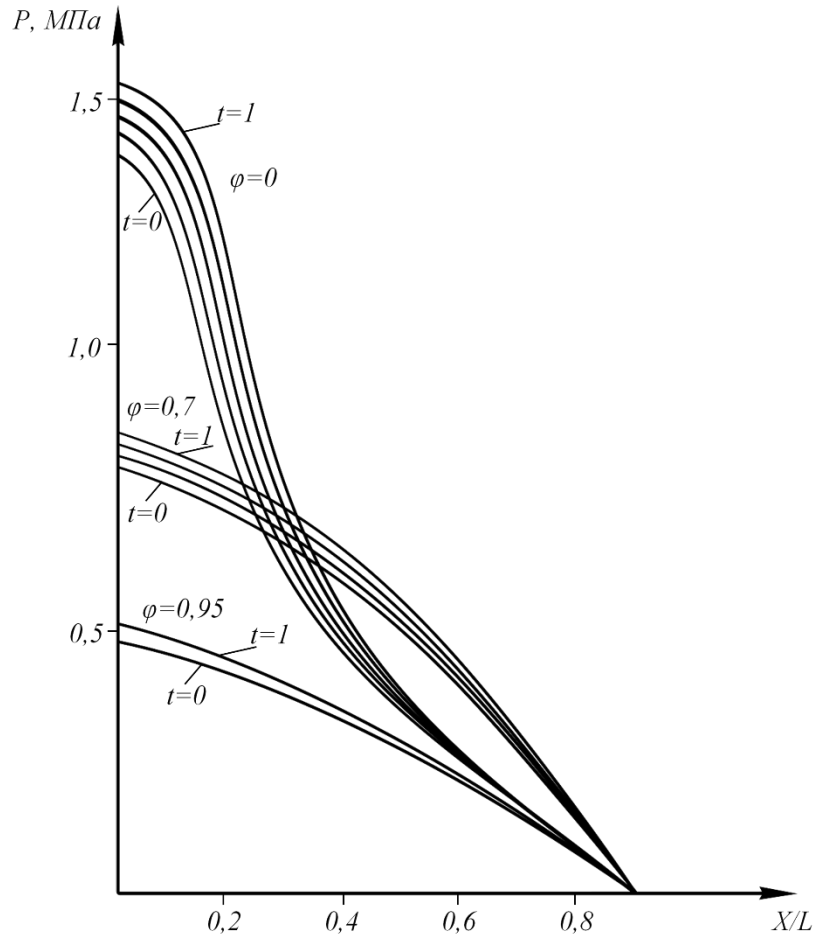


Рисунок 4 – Зміна тиску у рідинній фазі

З графіків видно, що чим більше газонасичення рідинної пробки, тим менший градієнт тиску, і отже, менший тиск на очисний поршень чинить рідинна пробка. Так, при газонасиченні пробки 70 % зниження тиску на поршень в порівнянні з чистою водяною пробкою становить 40,4 %, а при газонасиченні 95 % тиск на поршень знижується на 64,8 %.

З плином часу тиск у рідинній області зростає. Це викликано постійним прискоренням поршня і нестисненням рідкої фази. Зі збільшенням газонасичення в рідкій фазі зростання тиску на поршень сповільнюється. Так, при чисто рідинній пробці ( $\varphi=0$ ) тиск на поршень протягом 1 секунди зростає на 9,5 %, при газонасиченні  $\varphi=0,7$  тиск за цей же час збільшується на 4,9 %, а при газонасиченні  $\varphi=0,95$  зростання тиску на поршень за 1 секунду складе лише 2 %. З віддаленням від поршня зменшується як сама величина тиску, так і його зростання. Так, для чистої рідини ( $\varphi=0$ ) збільшення тиску в середньому перерізі за 1 секунду становить 2,46 %, в той час, як в початковому перерізі (в перерізі контакту поршня і пробки рідини) зростання тиску більше, ніж в 4 рази. Якщо газонасичення рідинних забруднень становить  $\varphi=0,7$ , то в середньому перетині ( $x/L=0,5$ ) зростання тиску за 1 секунду становить 4,05 %, а при газонасиченні  $\varphi=0,95$  зростання тиску становить 1,4 %.

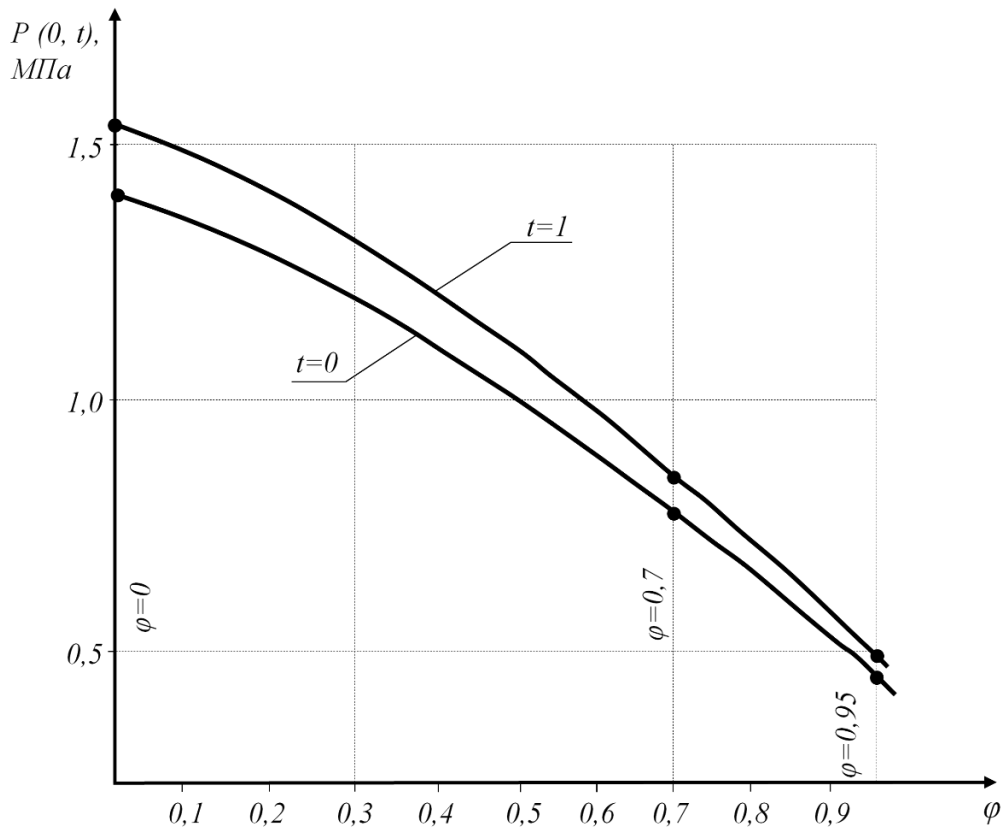


Рисунок 5 – Вплив газонасиченості рідинної пробки на величину тиску на поршень

В кожному перетині рідинної пробки з часом тиск зростає. Це викликано дією інерційних сил. При насиченні рідини газом спостерігається деяке зниження тиску в початковий момент руху очисного пристрою. Цей факт має таке фізичне пояснення. При виштовхуванні поршнем нестиснутої рідини на рідину впливає сила, пропорційна прискоренню поршня і обернено пропорційна його масі. Оскільки маса рідинної пробки набагато перевищує масу поршня, то передана рідині сила інерції викликає значно менше її прискорення, що, в свою чергу, призводить до виникнення сили взаємодії поршня і рідини. У випадку газонасиченої рідини в перший момент виникає аналогічна сила тиску на поршень. Однак, внаслідок стискання газорідинної суміші прискорення набувають лише тільки ті шари рідини, які безпосереднього контактують з поршнем. Внаслідок незначної маси і значно менших дотичних напружень тертя ці шари набувають більшого прискорення, ніж саме прискорення поршня. Однак, в наступний момент внаслідок пружності газонасиченого середовища тиск передається наступним шарам, а в перетині перед поршнем спостерігається деякий спад тиску. При газонасиченні  $\varphi=0,7$  він становить 1,13 % від початкового тиску, а при газонасиченні  $\varphi=0,95$  падіння тиску становить 1,57 % від початкової величини.

У **четвертому розділі** розглянуто техніко-економічні аспекти підвищення гідравлічної ефективності магістральних газопроводів та газотранспортних систем.

Основним показником ефективності роботи є оптимальна періодичність очистки газотранспортної системи, яка залежить від критерію оптимальності, екстремум якого задовольняє умовам проведення періодичних пропусків очисних засобів з метою підвищення гідравлічної ефективності. Тому в якості критерію оптимальності прийнято загальний прибуток підприємства з врахуванням затрат на проведення очисток. Функція мети представлена у вигляді алгебраїчної суми прибутку від реалізації газу з вирахуванням затрат на транспорт, в т.ч. затрат на проведення очисток. Отриманий таким чином розв'язок рівняння є оптимальною періодичністю профілактичних очисток газотранспортної системи.

Тому в якості критерію оптимальності прийнято загальний прибуток підприємства з врахуванням затрат на проведення очисток є функція мети, яка будується у вигляді

$$\Pi = f(c, E, s, n), \quad (5)$$

де  $\Pi$  – загальний прибуток підприємства;

$c$  – різниця між закупівельною ціною на газ та вартістю його реалізації (з урахуванням собівартості транспорту);

$E$  – гідравлічна ефективність газотранспортної системи;

$S$  – затрати на одну очистку;

$n$  – число очисток газопроводів за період часу експлуатації  $T$ .

Виходячи з цього оптимальна періодичність очистки газопроводу знаходиться з даного виразу диференціюючи його:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial n} = 0. \quad (6)$$

На основі даної похідної отримали трансцендентне рівняння для знаходження оптимального числа профілактичних очисток за період експлуатації  $T$  в вигляді

$$e^{-\frac{\lambda T}{n}} \left[ (\beta - \lambda) \sin\left(\beta \frac{T}{n}\right) - n(\beta - \lambda) \left( \lambda \sin\left(\beta \frac{T}{n}\right) + \frac{\beta T}{n^2} \cos\left(\beta \frac{T}{n}\right) \right) - \right. \\ \left. - (\beta + \lambda) \cos\left(\beta \frac{T}{n}\right) + n(\beta + \lambda) \left( \lambda \cos\left(\beta \frac{T}{n}\right) - \frac{\beta T}{n^2} \sin\left(\beta \frac{T}{n}\right) \right) \right] - \frac{s(\lambda^2 + \beta^2)T}{cQ_r E_0} = d. \quad (7)$$

Даний аналітичний розв'язок рівняння є оптимальною періодичністю профілактичних очисток газотранспортної системи.

Результати розрахунків свідчать, що для газопроводів, що входять в газотранспортну систему оптимальна періодичність очисток менша, ніж для

окремих простих газопроводів, не дивлячись на те, що затрати на проведення очистки газопроводу системи, менші, ніж затрати на проведення очистки окремого газопроводу за рахунок зменшення витрат газу в процесі очистки. Цей факт пояснюється тим, що для газотранспортної системи за рахунок перерозподілу рідини між паралельними нитками протягом сезонів темп падіння гідравлічної ефективності значно нижчий, ніж для окремого газопроводу.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ПІДСУМКОВІ ВИСНОВКИ

У результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень вирішено важливу науково-технічну задачу, що полягає у вдосконаленні методів підвищення гідравлічної ефективності магістральних газопроводів з врахуванням фізичних властивостей відкладень в них, що дозволить суттєво підвищити пропускну здатність газотранспортного комплексу і зменшити витрати на транспортування газу, а саме:

1. На основі статистичних даних довгострокового виробничого експерименту аналіз динаміки зміни гідравлічної ефективності газопроводів із врахуванням фізичних властивостей відкладень в їх порожнині та режимних параметрів їх роботи показав, що неврахування характеру і ступеня зміни внутрішньої енергії газового потоку призводить до зниження коефіцієнта гідравлічної ефективності на величину до 3-5 %.

2. Побудована математична модель процесу витіснення з газопроводу рідинних забруднень, які мають неньютонівські властивості дозволить внести корективи в планування процесу очистки газопроводу, зокрема у визначення оптимальної швидкості руху очисного пристрою, яка відхиляється від загальнопринятої на величину 17-30 %. Підтверджено вплив фізичних властивостей відкладень на початковій ділянці газопроводу на процес очистки в цілому. Розрахунки показали, що неврахування неньютонівських властивостей рідинних скупчень на початковій ділянці газопроводу призведе до пониження загальної ефективності нитки газопроводу від можливого значення майже на 6 %.

3. Запропоновано методику регулювання швидкості руху очисного пристрою на низхідних ділянках газопроводу з пересіченим профілем траси за допомогою зміни технологічної схеми лінійної частини, а саме підключення лупінгу. На основі викладеної методики розроблено алгоритм і складено програму розрахунку ступеня зменшення швидкості руху очисного поршня в залежності від роду технологічних параметрів та технічних характеристик поршня і газопроводу. За створеною програмою проведено ряд розрахунків, результати яких дозволяють зробити практично важливі висновки. Дослідження показали, що найбільш сильний вплив на ступінь зниження швидкості руху поршня має довжина лупінга.

4. Проведені теоретичні дослідження показали, що зі збільшенням тривалості фази гідравлічного удару величина тиску рідинних забруднень на ущільнюючі елементи очисного пристрою зменшується, що підвищує ефективність очищення трубопроводу. Для цього пропонується здійснювати аерацію рідинних скупчень, тобто створювати гомогенне двофазне середовище. Побудовано



математичну модель даного процесу на основі реалізації якої встановлено закономірності коливання тиску в газорідинному середовищі.

5. На основі результатів проведених аналітичних та теоретичних досліджень запропоновано методику визначення оптимальної періодичності проведення профілактичних очисток газотранспортної системи з умови максимального прибутку газотранспортного підприємства, який найбільш повноцінно відображає техніко-економічні показники. Результати розрахунків свідчать, що для газопроводів, що входять в газотранспортну систему оптимальна періодичність очисток менша, ніж для окремих простих газопроводів. Згідно одержаних розрахункових результатів можуть прийматися командні рішення про кількість профілактичних очисток на рік.

### **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Грудз В.Я., Слободян Н.Б. Підвищення ефективності очищення газопроводів від рідинних забруднень. Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2019. № 2(71). С. 49-54. **(наукове фахове видання України)**

2. Грудз В.Я., Слободян Н.Б. Оптимальна періодичність очистки газотранспортних систем. Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2019. № 4(73). С. 85-90. **(наукове фахове видання України)**

3. Грудз В.Я., Слободян Н.Б. Вплив фізичних властивостей рідин на процес очищення магістрального газопроводу від рідинних забруднень. Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2020. № 1(74). С. 89-95. **(наукове фахове видання України)**

4. Грудз В.Я., Слободян Н.Б. Підвищення ефективності очистки газопроводів шляхом регулювання швидкості руху очисних пристроїв. Нафтогазова енергетика. 2020. № 1(33). С. 29-35. **(наукове фахове видання України)**

5. Грудз Я.В., Криль М.Я., Мельницька Л.І., Слободян Н.Б., Стефанишин С.Р. Прогнозування аварійних витоків з трубопроводних систем. Прикарпатський вісник НТШ. Число. 2017. №2(38). С. 261-266. **(наукове фахове видання України)**

6. Grudz V. Ya., Grudz Ya. V., Zapukhliak V. B., Chudyk I. I., Poberezhny L. Ya., Slobodyan N. B., Vodnar V. M. Optimal gas transport management taking into account reliability factor. Management Systems in Production Engineering. 2020. Vol. 28, Issue 3. P. 202-208. **(зарубіжне наукове фахове видання)**

7. Слободян Н.Б. Моделювання напружено-деформованого стану систем складних переходів трубопроводів. Нафтогазова енергетика – 2017: тези доп. міжнар. наук.-техн. конф. (м. Івано-Франківськ, 15-19 трав. 2017 р.). Івано-Франківськ, 2017. С. 370-371.

## АНОТАЦІЯ

**Слободян Н.Б. Удосконалення методів та заходів підвищення гідравлічної ефективності магістральних газопроводів.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.15.13 – трубопровідний транспорт, нафтогазосховища. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу МОН України, Івано-Франківськ, 2021.

Дисертаційна робота присвячена удосконаленню методів та заходів підвищення гідравлічної ефективності магістральних газопроводів і газотранспортних систем з врахуванням фізичних властивостей відкладень в порожнині труб при плануванні та оптимізації процесу очищення. Отримані результати дають можливість підвищити коефіцієнт гідравлічної ефективності та забезпечити високу ступінь очисток діючих магістральних газопроводів.

У роботі досліджено вплив фізичних властивостей рідин на процес очищення магістральних газопроводів від рідинних скупчень. Отримано формулу для розрахунку поправочного коефіцієнта, який враховує реологічні властивості рідини. Здійснено оцінку зміни швидкості руху очисного пристрою при зміні технологічної схеми магістрального газопроводу. Побудовано математичну модель процесу на основі реалізації якої встановлено закономірності руху очисного пристрою при зміні технологічної схеми газопроводу. Запропоновано алгоритм підвищення ефективності очищення трубопроводу, що базується на зменшенні перетоків через рухому границю при витисненні рідини з трубопроводу очисним поршнем шляхом аерації рідинних забруднень. Результати проведених досліджень дозволили встановити вплив газового вмісту рідинних скупчень на величину перетоків у простір за поршнем. Досліджено залежність прибутку газотранспортного підприємства від числа очисток газопроводу за певний період часу. Отримано рівняння для оптимізації періодичності процесу очистки газотранспортних систем з метою забезпечення максимального значення гідравлічної ефективності.

**Ключові слова:** гідравлічна ефективність, газопроводи, очисний поршень, рідинні скупчення, неньютонівська рідина, регулювання швидкості, лупінг, гідроудар, газонасичення, оптимальна періодичність.

## АННОТАЦИЯ

**Слободян Н.Б. Совершенствование методов и мер повышения гидравлической эффективности магистральных газопроводов.** – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.15.13 – трубопроводный транспорт, нафтогазосховища. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу МОН України, Івано-Франківськ, 2021.

Диссертационная работа посвящена совершенствованию методов и мер повышения гидравлической эффективности магистральных газопроводов и газотранспортных систем с учетом физических свойств отложений в полости труб

при планировании и оптимизации процесса очистки. Полученные результаты дают возможность повысить коэффициент гидравлической эффективности и обеспечить высокую степень очисток действующих магистральных газопроводов.

В работе исследовано влияние физических свойств жидкостей на процесс очистки магистральных газопроводов от жидкостных скоплений. Получена формула для расчета поправочного коэффициента, который учитывает реологические свойства жидкости. Осуществлена оценка изменения скорости движения очистного устройства при изменении технологической схемы магистрального газопровода. Построена математическая модель процесса на основе реализации которой установлены закономерности движения очистного устройства при изменении технологической схемы газопровода. Предложен алгоритм повышения эффективности очистки трубопровода, основанный на уменьшении перетоков через подвижную границу при вытеснении жидкости из трубопровода очистным поршнем путем аэрации жидкостных загрязнений. Результаты проведенных исследований позволили установить влияние газового содержания жидкостных скоплений на величину перетоков в пространство за поршнем. Исследована зависимость прибыли газотранспортного предприятия от числа очисток газопровода за определенный период времени. Получено уравнение для оптимизации периодичности процесса очистки газотранспортных систем с целью обеспечения максимального значения гидравлической эффективности.

**Ключевые слова:** гидравлическая эффективность, газопроводы, очистительный поршень, жидкостные скопления, неньютоновская жидкость, регулировка скорости, лупинг, гидроудар, газонасыщения, оптимальная периодичность.

## ABSTRACT

**Slobodian N.B. Methods and measures improvement to increase main gas pipelines hydraulic efficiency.** – Manuscript.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences (PhD) in the specialty 05.15.13 – pipeline transportation, oil and gas storages. – Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ministry of Education and Science of Ukraine, Ivano-Frankivsk, 2021.

The dissertation is devoted to the improvement of methods and measures to increase the hydraulic efficiency of main gas pipelines and gas transmission systems, taking into account the physical properties of deposits in the pipe cavity when planning and optimizing the cleaning process. The obtained results make it possible to increase the coefficient of hydraulic efficiency and ensure a high degree of cleaning of existing main gas pipelines.

The paper considers modern methods of increasing the efficiency of pipeline transport cleaning. The most effective method of increasing the efficiency of the pipeline is its periodic cleaning using mechanical cleaning devices. The reasons for the decrease in efficiency are the presence of liquid in the cavity of the pipeline, which can be in two forms - high-viscosity resin deposits and low-viscosity liquid deposits. Deposits reduce the cross-sectional area and increase the hydraulic resistance. Regardless of the design of the

treatment plant, none of them can completely remove liquid contaminants. The causes of overflows across the moving boundary, which lead to the deterioration of the quality of gas pipeline cleaning, are analyzed.

The influence of physical properties of liquids on the process of purification of main gas pipelines from liquid accumulations is investigated. A formula for calculating the correction factor, which takes into account the rheological properties of the liquid. The optimal speed of the purification device, which depends on the properties and rheology of the non-Newtonian fluid, is determined.

The estimation of speed change of the clearing device movement at change of the main gas pipeline technological scheme is carried out. The mathematical model of process on the basis of which regularities of the clearing device movement at change of the gas pipeline technological scheme, is established is constructed. An algorithm has been developed and a program for calculating the degree of reduction of the piston speed depending on the type of technological parameters and technical characteristics of the treatment device and the pipeline has been developed.

An algorithm for increasing the efficiency of pipeline cleaning is proposed, which is based on the reduction of flows through the moving boundary when expelling liquid from the pipeline by a cleaning piston by aeration of liquid contaminants. The influence of the gas content of liquid accumulations on the amount of flows into the space behind the piston is established. A mathematical model of the process is constructed, on the basis of the realization of which the regularities of pressure fluctuations in a gas - liquid medium are established.

The process of gas transmission systems cleaning with the help of cleaning pistons is technologically complex and expensive. Therefore, when planning it is necessary to create all the conditions that would ensure maximum cleaning efficiency and be cost-effective. Increasing the number of cleanings of gas transmission systems increases their hydraulic efficiency, which leads to an increase in profits of gas transmission organizations. As a result, the cost of cleaning increases, which leads to a decrease in profits of gas transmission companies. Therefore, the number of cleanings of gas pipelines and gas transmission systems should be equal to the optimal number of cleanings for a certain period of time. Assessment indicators of economic efficiency of internal cavity cleaning measures of gas pipelines are analyzed. It is established that a more specific indicator of the assessment of gas pipeline cleaning measures is the increase in the total profit of the gas transmission company. The dependence of the profit of the gas transportation enterprise on the number of cleanings of the gas pipeline for a certain period of time is investigated. A method for determining the optimal frequency of gas transmission systems cleaning has been developed. A mathematical model of the process is built, on the basis of which a transcendental equation is obtained to find the optimal number of cleanings of gas transmission systems for a certain period of operation. A graphoanalytical method for its solution is proposed.

**Key words:** hydraulic efficiency, gas pipelines, cleaning piston, liquid accumulations, non-Newtonian fluid, speed regulation, looping, hydraulic shock, gas saturation, optimal periodicity.