

УДК 622.692.4

**Середюк Марія Дмитрівна**

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри  
транспорту і зберігання нафти і газу  
Івано-Франківський національний технічний  
університет нафти і газу

**Григорський Станіслав Ярославович**

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

**Середюк Мария Дмитриевна**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой  
транспорта и хранения нефти и газа  
Ивано-Франковский национальный технический  
университет нефти и газа

**Григорский Станислав Ярославович**

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

**Serediuk M.**

doctor of technical sciences, professor, head of department  
department of transport and storage of oil and gas  
Ivano-Frankivsk national technical university of oil and gas

**Grygorskyi S.**

PhD, assistant lecturer,  
department of transport and storage of oil and gas  
Ivano-Frankivsk national technical university of oil and gas

## **ЗАКОНОМІРНОСТІ ЗМІНИ ВИТРАТИ НАФТИ В НАФТОПРОВІДІ В ПРОЦЕСАХ ЗАПУСКУ НАСОСНИХ АГРЕГАТІВ**

## **ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ РАСХОДА НЕФТИ В НЕФТЕПРОВОДЕ В ПРОЦЕССАХ ЗАПУСКА НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ**

## **THE PATTERNS OF CHANGE IN VOLUME FLOW OF OIL PIPELINE IN THE PROCESSES OF STARTUPS OF PUMPING UNITS**

**Анотація:** Шляхом експериментальних досліджень, що проведені з використанням сучасних засобів вимірювання на діючому нафтопроводі, встановлено тривалість перехідного процесу зміни витрати нафти при запуску насосного агрегату на нафтоперекачувальній станції (НПС). Для кожного з трьох етапів неусталеного процесу побудовано поліноміальні моделі зміни витрати нафти у часі на НПС, де відбувся запуск нафтового насоса серії НМ. Встановлено, що зміну амплітуди стрибкоподібного зростання витрати нафти від відстані до місця збурення можна достовірно описати експоненціальною функцією.

**Ключові слова:** неусталений гідродинамічний процес, хвиля тиску, швидкість поширення хвилі тиску, коефіцієнт затухання стрибкоподібної зміни витрати, стрибкоподібна зміна витрати.

**Аннотация:** Путем экспериментальных исследований, проведенных с использованием современных средств измерения на действующем нефтепроводе, установлено продолжительность переходного процесса изменения расхода нефти при запуске насосного агрегата на нефтеперекачивающей станции (НПС). Для каждого из трех этапов неустановившегося процесса построены полиномиальные модели изменения расхода нефти во времени на НПС, где произошел запуск нефтяного насоса серии НМ. Установлено, что изменение амплитуды скачкообразного увеличения расхода нефти от расстояния до места возмущения можно достоверно описать экспоненциальной функцией.

**Ключевые слова:** неустановившейся гидродинамический процесс, волна давления, скорость распространения волны давления, коэффициент затухания скачкообразного изменения расхода, скачкообразное изменение расхода.

**Summary:** The duration of transient process of change in volume flow in oil pipeline by startup of pumping unit in oil pumping station (OPS) was determined with the help of processed industrial data after experiments carried out on the working oil pipeline. For each of the three stages of the transient process were built polynomial models in change of volume flow of oil at the time on the OPS where was launched pumping unit of OM series. It was found out, that the actual value of abruptly changing volume flow of oil on the distance to the origin of the disturbance can be reliably described by an exponential function.

**Keywords:** unstable hydrodynamic process, pressure wave, the speed of propagation of pressure, volume flow wave damping factor, an abrupt volume flow change.

Транспортна спроможність магістрального нафтопроводу залежить від десятків чинників, а саме: геометричних характеристик його лінійної частини, особливостей профілю траси, фізичних властивостей транспортованої рідини, гідродинамічних характеристик насосних агрегатів, що встановлені на нафтоперекачувальних станціях (НПС), схем спільної роботи насосних агрегатів на НПС, технологічних обмежень тиску на вході і виході НПС тощо. За усталених режимів експлуатації нафтопроводу його пропускна здатність може бути визначена із рівняння балансу енергії, що створюють насосні агрегати на НПС, і загальних втрат енергії на транспортування нафти.

Магістральні нафтопроводи України сьогодні працюють з неповним завантаженням. Для регулювання обсягів транспортування нафти нафтопроводами використовують різні комбінації включених насосних агрегатів на НПС. Кожна зупинка чи запуск насосного агрегату на НПС

спричинює виникнення нестационарних (перехідних) процесів, що характеризуються швидкоплинними змінами як тиску, так і витрати транспортованої рідини [1, 2, 3].

Що стосується змін тиску під час перехідних процесів у нафтопроводах, то зазначене питання не один раз було предметом наукових досліджень. У шістдесяті-вісімдесяті роки минулого століття опубліковано низку робіт В'язунова Е. В., Мороза П. А., Полянської Л. В., Перевощикова С. І., які містили результати теоретичних досліджень закономірностей поширення хвиль тиску при зупинках одного чи кількох насосних агрегатів. Закономірності зміни тиску, спричинені зупинками насосних агрегатів на НПС магістральних нафтопроводів всесторонньо розглянуті нами в роботах [4-8]. У роботах [4, 5, 8] наведено результати експериментальних досліджень впливу зупинок насосних агрегатів на динаміку поширення хвиль тиску під час перехідних процесів в магістральних нафтопроводах. Роботи [5, 6] містять результати теоретичних досліджень закономірностей зміни тиску в магістральному нафтопроводі за перехідних процесів, спричинених зупинками насосних агрегатів.

Під час перехідних процесів в нафтопроводах, спричинених зупинкою або запуском насосних агрегатів, суттєво змінюється не тільки тиск, але і витрата нафти. Тому перехідні процеси впливають на пропускну здатність магістрального нафтопроводу. Причому, чим більша кількість і тривалість перехідних процесів, тим помітніше фактична пропускну здатність нафтопроводу буде відрізнятися від значення, яке визначене за загальноприйнятими методиками, що базуються на гідродинамічних рівняннях усталеного руху рідини у трубопроводі.

На сьогодні питання впливу перехідних процесів на величину витрати нафти у нафтопроводі, на пропускну здатність нафтотранспортної системи не знайшло відображення у роботах вітчизняних і зарубіжних вчених.

Одним із основним параметрів, який визначає функціональність магістрального нафтопроводу, є його пропускна здатність. Адекватне прогнозування даного параметра дає змогу раціонально планувати обсяги перекачування нафти, оптимізувати режими експлуатації нафтопроводу за різними критеріями, більш точно визначати об'єм нафти, що знаходиться у порожнині трубопроводу.

Наведене вище визначає актуальність та важливість досліджень закономірностей зміни витрати за перехідних процесів у нафтопроводах, спричинених зміною кількості працюючих насосних агрегатів.

Метою роботи є встановлення експериментальним шляхом на діючому магістральному нафтопроводі закономірностей зміни витрати нафти при запусках насосних агрегатів.

У процесі досліджень вирішувались такі задачі:

1) встановлення тривалості перехідного процесу зміни витрати нафти у нафтопроводі при запуску насосного агрегату на НПС;

2) виявлення закономірностей зміни витрати нафти у часі на НПС, де відбувся запуск нафтового насоса серії НМ;

3) встановлення закономірностей зміни витрати нафти у часі на інших нафтоперекачувальних станціях, що розташовані до і після НПС, на якій здійснений запуск насосного агрегату.

Методи дослідження – вимірювання параметрів руху нафти в магістральних нафтопроводах, математичне опрацювання результатів з використанням комп'ютерних технологій.

Промислові експерименти проведено на ділянці вітчизняного нафтопроводу, що має номінальний діаметр 700 мм і протяжність 400 км. На трасі нафтопроводу працюють чотири НПС, оснащені сучасними нафтовими насосами серії НМ. На ділянці нафтопроводу встановлено 15 контрольних пунктів (КП), оснащених сучасними засобами контролю тиску. Для вимірювання тиску транспортованої рідини використовують сучасні давачі тиску типу Mikrotran F-R Fishers з класом точності 0,075-0,1.

За швидкоплинних перехідних процесів у нафтопроводі вимірювання тиску нафти проводилось з частотою 0,2 с.

Для вимірювання витрати нафти на кожній НПС обладнаний вузол обліку нафти (ВОН). На НПС1 улаштовано пункт обліку, який складається з трьох паралельних ниток та оснащений турбінними витратомірами об'ємної витрати нафти. На всіх інших проміжних НПС встановлено систему вимірювання витрати нафти Uniflow фірми Controlotron, в яку входить потоковий накладний двоканальний ультразвуковий витратомір. Розрахункову схему ділянки нафтопроводу, на якій проведені промислові експерименти, наведено на рисунку 1.

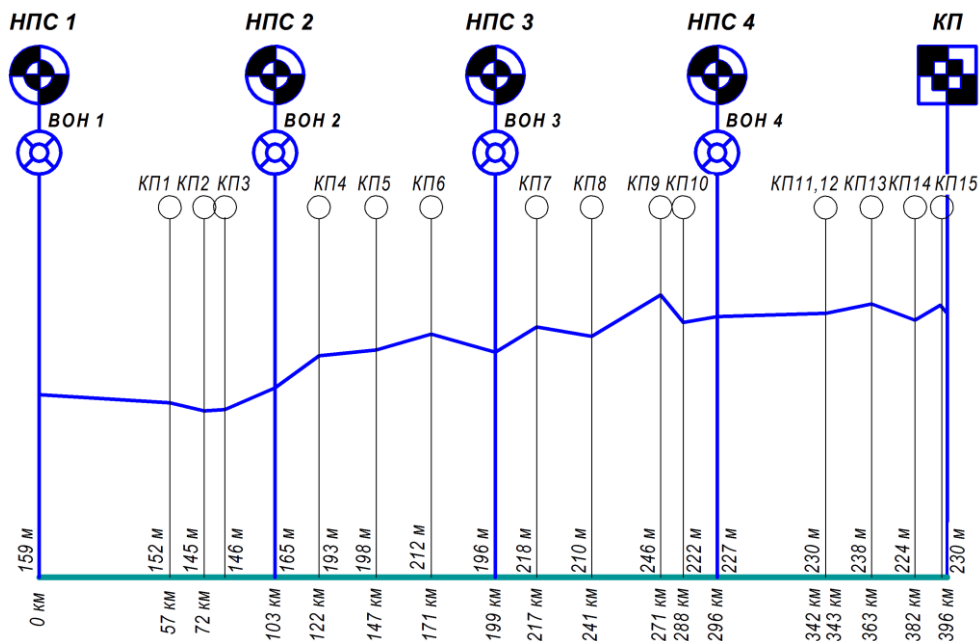


Рис. 1. Розрахункова схема ділянки магістрального нафтопроводу, на якій проведені промислові експерименти

Під час проведення промислових експериментів густина транспортованої нафти змінювалась у діапазоні від 864 до 875 кг/м<sup>3</sup>. Коефіцієнт кінематичної в'язкості нафти варіював від 15 до 35 сСт.

Аналіз результатів значної кількості промислових експериментів засвідчив, що при запуску насосного агрегату на довільній НПС спостерігаються зміни витрати нафти на кожній НПС, а також у кожній точці лінійної частини нафтопроводу.

Проілюструємо одержані результати для одного із режимів роботи, за якого на НПС1 і НПС3 працювало по одному магістральному насосу. Витрата нафти в нафтопроводі до запуску додаткового насосного агрегату становила 1130 м<sup>3</sup>/год. О 15 год 17 хв був здійснений запуск насосного агрегату МА3 на НПС2. Графічну закономірність зміни у часі тиску, створеного насосним агрегатом МА3, та витрати нафти на НПС2 під час перехідного процесу зображено на рисунку 2.

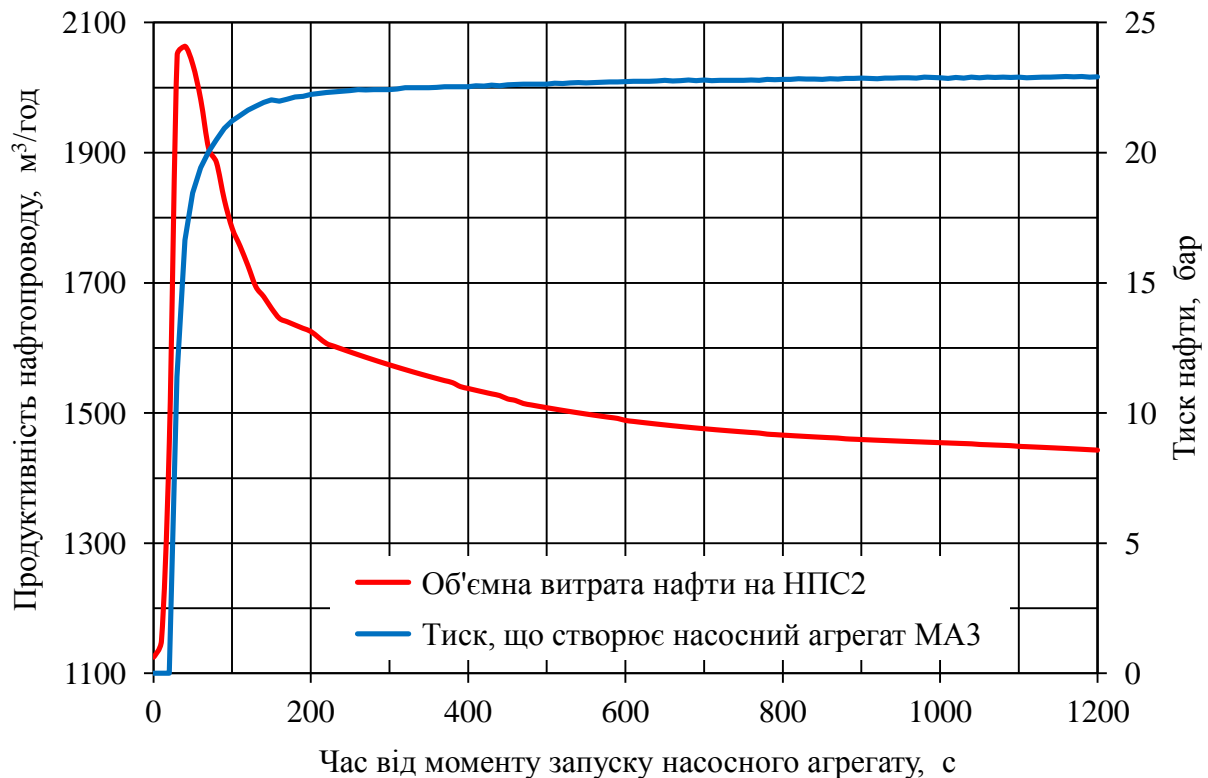


Рис. 2. Зміна тиску, створеного насосним агрегатом МА3, та продуктивності НПС2 під час перехідного процесу

Із рисунка 2 видно, що протягом 30 с після запуску насосного агрегату МА3 створений ним тиск стрибкоподібно зріс до значення 15 бар, потім протягом двох хвилин зростав з меншою інтенсивністю до значення 22 бар, після цього протягом 18 хвилин стабілізувався на значенні 23 бар. Завантаження додаткового насосного агрегату спричинило відповідні зміни витрати нафти на НПС 2. За першого етапу перехідного процесу тривалістю до 30 с витрата нафти стрибкоподібно зросла майже вдвічі – з 1130 м<sup>3</sup>/год до 2070 м<sup>3</sup>/год. Отже амплітуда стрибкоподібного зростання

витрати нафти на НПС2 становила  $940 \text{ м}^3/\text{год}$ . За другого етапу тривалістю до двох хвилин витрата нафти інтенсивно зменшувалася до значення  $1660 \text{ м}^3/\text{год}$ . Третій етап перехідного процесу тривалістю 18 хвилин характеризувався менш інтенсивним зменшенням витрати нафти до значення, що відповідає новому усталеному режиму роботи нафтопроводу –  $1450 \text{ м}^3/\text{год}$ . Загальна тривалість перехідного процесу в нафтопроводу як за змінами тиску, так і за змінами витрати нафти становила порядку двадцять хвилин.

Для режиму експлуатації, що аналізується, одержані такі математичні залежності витрати нафти на НПС2, де відбувся запуск насоса, від часу перехідного процесу  $t$ :

- для першого етапу перехідного процесу у діапазоні часу від 0 до 30 с

$$Q = 1,456 \cdot t^2 - 12,45 \cdot t + 1130; \quad (1)$$

- для другого етапу перехідного процесу у діапазоні часу від 30 до 130 с

$$Q = 1,790 \cdot 10^{-2} \cdot t^2 - 6,911 \cdot t + 2258; \quad (2)$$

- для третього етапу перехідного процесу у діапазоні часу від 130 до 1200 с

$$Q = -2,617 \cdot 10^{-7} \cdot t^3 + 7,730 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 - 8,068 \cdot 10^{-1} \cdot t + 1755. \quad (3)$$

Хвиля пониженого тиску, створена запуском насосного агрегату на НПС2, зі швидкістю звуку рухалася нафтопроводом до НПС1, викликаючи зміни тиску у кожному перерізі трубопроводу. Зміни тиску спричинили відповідні зміни витрати нафти. Рисунок 3 ілюструє закономірності зміни витрати нафти у часі на НПС1, що розміщена перед НПС2 (за рухом нафти) на відстані 103 км від місця виникнення збурення.



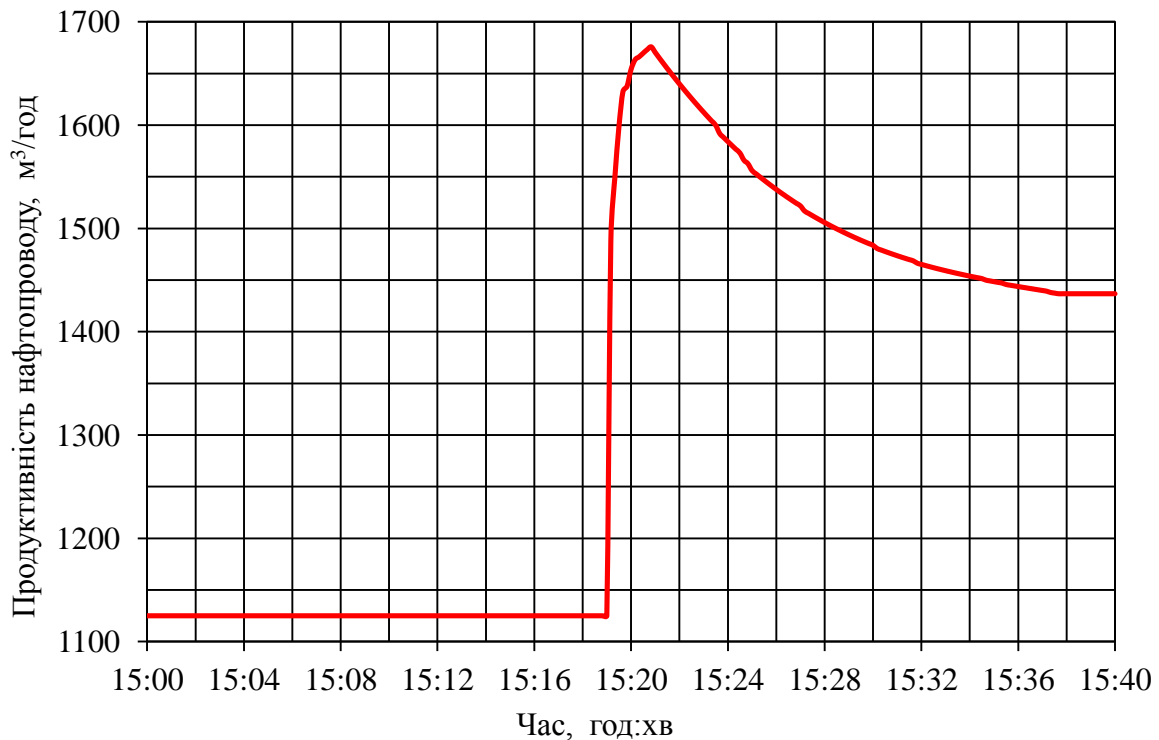


Рис. 3. Зміна об'ємної витрати нафти у часі на НПС1 при запуску насосного агрегату МА3 на НПС2 за результатами промислового експерименту

Із рисунка 3 випливає, що на НПС1, яка розміщена перед НПС2, де відбувся запуск насосного агрегату МА3, під час перехідного процесу також спостерігалися помітні зміни витрати нафти. Під час першого етапу тривалістю 30 с витрата нафти стрибкоподібно зросла із значення 1130 м<sup>3</sup>/год до 1450 м<sup>3</sup>/год. Таким чином, внаслідок затухання хвилі тиску амплітуда стрибкоподібного зростання витрати нафти на НПС1 значно менша, ніж на НПС2, і становить всього 320 м<sup>3</sup>/год. Під час другого етапу перехідного процесу тривалістю біля двох хвилин витрата нафти продовжувала зростати з меншою інтенсивністю до значення 1670 м<sup>3</sup>/год. На завершальному етапі перехідного процесу тривалістю 18 хвилин витрата нафти зменшувалася і стабілізувалися на значенні 1450 м<sup>3</sup>/год, що відповідає новому усталеному режиму експлуатації нафтопроводу.

Запуск насосного агрегату МА3 на НПС2 спричинив виникнення хвилі підвищеного тиску. Після НПС2 (за рухом нафти) на трасі нафтопроводу знаходяться ще дві нафтоперекачувальні станції НПС3 і

НПС4 (рисунок 1). Хвиля підвищеного тиску зі швидкістю звуку рухалася нафтопроводом до НПС3 і НПС4, викликаючи зміни тиску та витрати нафти у кожного перерізі трубопроводу. Рисунки 4 і 5 ілюструють одержані експериментальним шляхом закономірності зміни витрати нафти у часі на НПС3 і НПС4, що розміщені після НПС2 на відстані 96 та 193 км відповідно від місця виникнення збурення.

Рисунки 4 і 5 виявили однакову тенденцію щодо зростання витрати нафти під час перехідного процесу. У момент підходу хвилі підвищеного тиску до контрольного пункту спостерігалось стрибкоподібне зростання витрати нафти, після цього витрата нафти протягом кількох хвилин зростала з меншою інтенсивністю. На завершальному етапі перехідного процесу витрата нафти повільно збільшувалася і стабілізувалася на величині, що відповідає новому усталеному режиму експлуатації нафтопроводу.

Аналіз рисунків 4 і 5 засвідчує, що із збільшенням відстані від місця збурення спостерігається поступове затухання хвилі підвищеного тиску, що спричинює зменшення амплітуди стрибкоподібного зростання витрати нафти. Однак помітного зменшення тривалості перехідного процесу щодо стабілізації витрати із збільшенням відстані від місця збурення промислові експерименти не виявили.

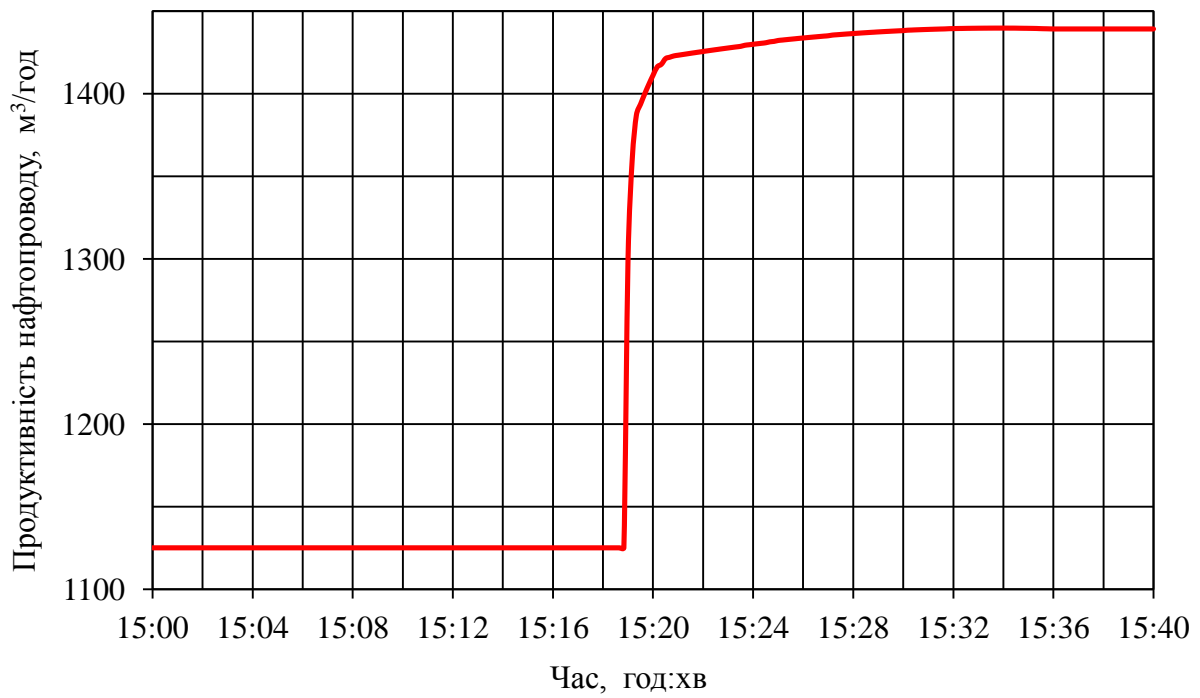


Рис. 4. Зміна об'ємної витрати нафти у часі на НПС3 при запуску насосного агрегату МА3 на НПС2 за результатами промислового експерименту

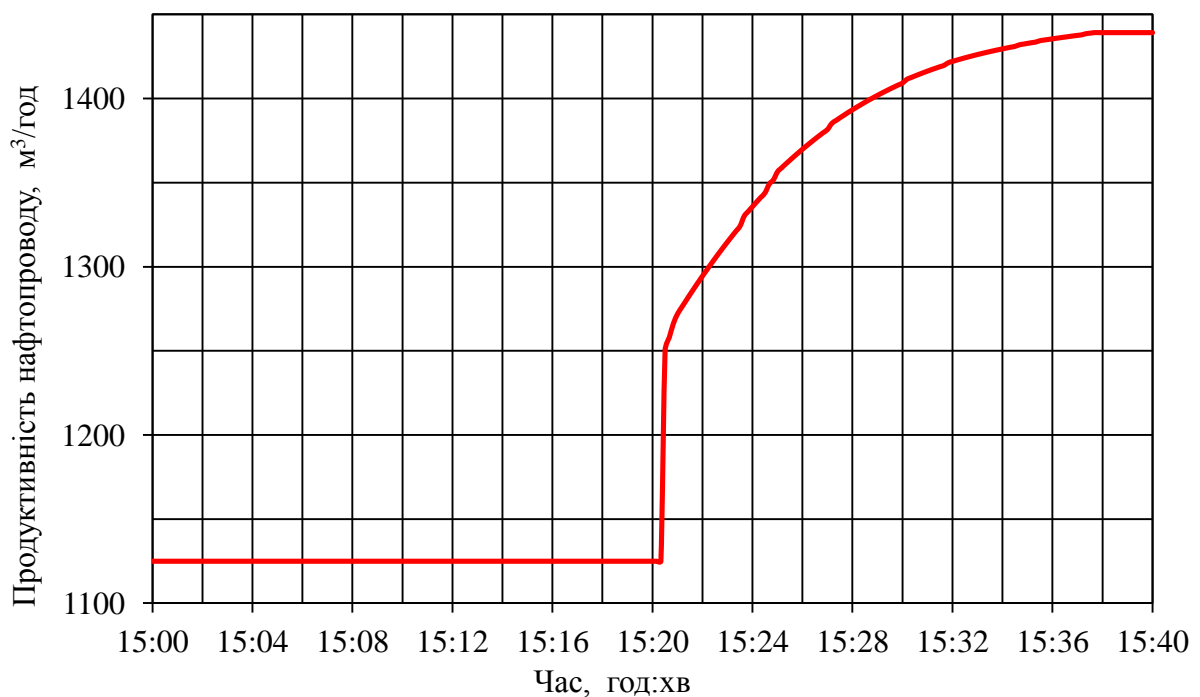


Рис. 5. Зміна об'ємної витрати нафти у часі на НПС4 при запуску насосного агрегату МА3 на НПС2 за результатами промислового експерименту

За аналогією із раніше виявленими закономірностями щодо зміни тиску під час перехідних процесів у нафтопроводах [4], можна прогнозувати, що зміну амплітуди стрибкоподібного зростання витрати нафти від відстані до місця збурення можна описати експоненціальною функцією

$$\Delta Q = \Delta Q_{ннс} \cdot \exp -K_{зв} \cdot x , \quad (4)$$

де  $\Delta Q_{ннс}$  - значення стрибкоподібного підвищення витрати нафти на НПС, на якій відбувся запуск насосного агрегату;

$K_{зв}$  - коефіцієнт затухання стрибкоподібної зміни витрати нафти;

$x$  - відстань по трасі нафтопроводу від місця виникнення збурення до довільного перерізу трубопроводу.

На рисунку 6 наведено одержану для одного із режимів експлуатації нафтопроводу графічну залежність величини стрибкоподібного підвищення витрати нафти від відстані від НПС2, де здійснений запуск насосного агрегату. Виконано математичне моделювання графічної залежності з використанням засобів Microsoft Office Excel.

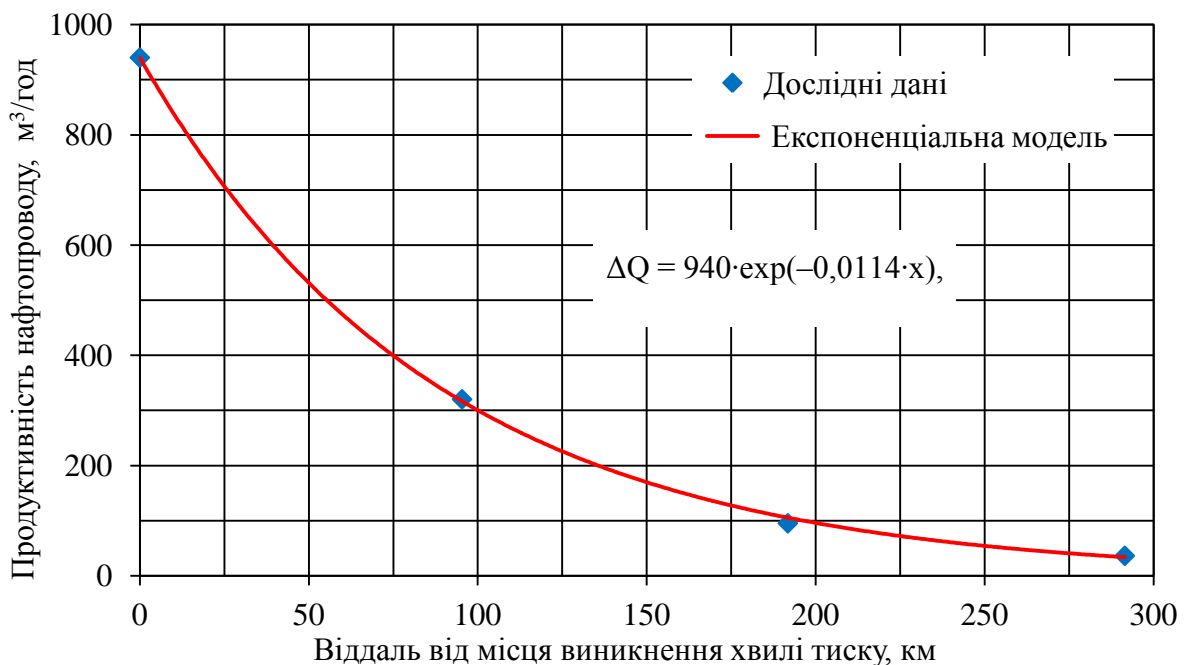


Рис. 6. Залежність величини стрибкоподібного підвищення витрати нафти від відстані до НПС2, на якій здійснено запуск насосного агрегату (витрата нафти до запуску 1130 м³/год)

У результаті одержано такий аналітичний вираз для залежності величини стрибкоподібного підвищення витрати нафти ( $\text{м}^3/\text{год}$ ) від відстані  $x$  (км) до НПС2, де здійснений запуск насосного агрегату

$$\Delta Q = 940 \cdot \exp -0,0114 \cdot x . \quad (5)$$

Експериментальні дослідження впливу запусків насосних агрегатів на закономірності зміни тиску нафти в магістральному нафтопроводі, дали змогу зробити такі висновки:

1. Тривалість завантаження нафтових магістральних насосних агрегатів серії НМ у процесі їх запуску щодо обертової частоти становить 10 с, щодо тиску, створеного насосом, до 2 хв. Процес запуску насосного агрегату включає три етапи, що характеризуються різною інтенсивністю збільшення його продуктивності: перший, тривалістю до 30 с відповідає стрибкоподібному підвищенню витрати; другий, тривалістю до двох хвилин, відповідає більш повільному зменшенню витрати нафти, і третій, тривалістю до 20-25 хвилин, характеризується пониженню витрати до значення, що відповідає новому усталеному режиму роботи нафтопроводу.

2. На нафтоперекачувальних станціях, що розташовані до і після НПС, де відбувся запуск насосного агрегату другий і третій етап перехідного процесу характеризується монотонним зростанням витрати нафти. Неусталений процес зміни витрати нафти на всіх етапах адекватно описується поліноміальною функцією часу, який відлічується від моменту запуску насосного агрегату (на НПС, де відбувся запуск) та часу, який відлічується від моменту приходу хвилі продуктивності нафти (для інших НПС).

3. Амплітуда хвилі зміни витрати при русі трубопроводом помітно зменшується, що призводить до її затухання. Залежність величини стрибкоподібного підвищення витрати нафти під час першого етапу перехідного процесу можна з високим ступенем достовірності описати експоненціальною функцією від відстані до місця виникнення збурення, спричиненого запуском насосного агрегату на НПС.

### **Література:**

1. Zhifeng, L., Peng, W., Dazhuan, W., Leqin, W. (2011). Experimental and numerical study of transient flow in a centrifugal pump during startup. *Journal of mechanical science and technology*, 3, 749-757.
2. Tsukamoto, H., Ohashi, H. (1982). Transient characteristics of a centrifugal pump during starting period. *Journal of fluids engineering*, 1, 392–399.
3. Sami, E. Ezzeddine, H. (2011). Influence of pump starting times on transient flows in pipes. *Nuclear engineering and design*, 9, 3624–3631.
4. Середюк М. Д. Експериментальні дослідження перехідних процесів у магістральних нафтопроводах, спричинених зупинками насосних агрегатів / М. Д. Середюк, С. Я. Григорський // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. - 2013. - № 2 (35). - С. 16-29.
5. Григорський С. Я. Результати експериментальних досліджень закономірностей гідродинамічних процесів у нафтопроводі за зміни кількості працюючих насосних агрегатів / С. Я. Григорський, М. Д. Середюк / Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. - 2014. - № 1 (50). - С. 161-172.
6. Григорський С. Я. Дослідження впливу зупинок насосних агрегатів на режим роботи магістральних нафтопроводів / С. Я. Григорський, М. Д. Середюк // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. - 2014. - № 1 (36) - С. 92-102.
7. Григорський С. Я. Методика розрахунку гідродинамічних процесів, спричинених зупинками насосних агрегатів магістрального нафтопроводу / С. Я. Григорський, М. Д. Середюк // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. - 2014.-№ 4 (53). - С. 65-71.
8. Середюк М. Д. Закономерности изменения давления в нефтепроводах при остановках насосных агрегатов / М. Д. Середюк, С. Я. Григорский // Нефтяное хозяйство. - 2015. - № 2 - С. 100-104.