

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У МАГІСТРАЛЬНИХ НАФТОПРОВОДАХ, СПРИЧИНЕНИХ ЗУПИНКАМИ НАСОСНИХ АГРЕГАТІВ

М.Д. Середюк, С.Я. Григорський

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 727139,  
e-mail: tznng@nung.edu.ua

Шляхом експериментальних досліджень, що проведені з використанням сучасних засобів вимірювання на діючому нафтопроводі, одержані закономірності неусталених гідродинамічних процесів з урахуванням специфіки технології експлуатації та характеристик насосного обладнання вітчизняних нафтопроводів.

Досліджено закономірності зміни у часі обертової частоти, тиску та подачі нафтових насосів серії НМ під час їх зупинки. Виявлено характер зміни у часі тиску транспортованої нафти на вході і виході нафтоперекачувальної станції при зупинці на ній одного або кількох послідовно працюючих насосних агрегатів.

Проаналізовано фактичне перевантаження по тиску лінійної частини нафтопроводу, спричинене зупинкою насосних агрегатів. Побудовані експоненціальні залежності величини стрибкоподібного підвищення тиску нафти від відстані до місця виникнення збурення. Оцінена інтенсивність затухання хвилі підвищеного тиску транспортованої нафти в нафтопроводі.

За результатами експериментальних досліджень встановлена фактична швидкість поширення хвилі підвищеного тиску нафти в трубопроводі. Її величина на 12% перевищує значення, що розраховане за теоретичною формулою.

Ключові слова: неусталений гідродинамічний процес, хвиля підвищеного тиску, швидкість поширення хвилі підвищеного тиску, коефіцієнт затухання хвилі, стрибкоподібне підвищення тиску.

С помощью экспериментальных исследований, проведенных с использованием современных средств измерения на действующем нефтепроводе, получены закономерности неустановившихся гидродинамических процессов с учетом специфики технологии эксплуатации и характеристик насосного оборудования отечественных нефтепроводов.

Исследованы закономерности изменения во времени частоты вращения, давления и подачи нефтяных насосов серии НМ при их остановке. Определен характер изменения во времени давления транспортируемой нефти на входе и выходе нефтеперекачивающей станции при остановке одного или нескольких последовательно работающих насосов.

Проанализирована фактическая перегрузка линейной части нефтепровода, вызванная остановкой насосных агрегатов. Построены экспоненциальные зависимости величины скачкообразного повышения давления нефти от расстояния до места возмущения. Оценена интенсивность затухания волны повышенного давления транспортируемой по нефтепроводу нефти.

По результатам экспериментальных исследований установлена фактическая скорость распространения волны повышенного давления нефти в трубопроводе. Ее величина на 12% превышает значение, рассчитанное по теоретической формуле.

Ключевые слова: неустановившийся гидродинамический процесс, волна повышенного давления, скорость распространения волны повышенного давления, коэффициент затухания волны, скачкообразное повышение давления.

The principles of transient hydrodynamic processes specific to operation technology and characteristics of domestic oil pumping equipment were received through experimental studies conducted with application of modern means of measurements on existing pipeline.

The principles of time variations regarding rotation frequency, pressure and oil supply of NM series pump during their shutdown mode were analysed. The nature of time variation of transported oil pressure at the inlet and outlet of oil pumping station, when one or more serially operating pumps stop was estimated.

The actual overload of the pipeline linear part caused by pumping unit stoppage was analysed. The exponential dependence of the oil pressure surge from the distance to the point of agitation was worked out. The intensity of the increased pressure wave damping of the transported oil was estimated.

By results of the experimental studies, the actual velocity of positive pressure wave propagation in the oil pipeline was established. Its value by 12% exceeds the value, estimated by the theoretical formula.

Key words: transient hydrodynamic process, positive pressure wave, velocity of positive pressure wave propagation, wave damping coefficient, pressure surge.

Під час експлуатації магістральних нафтопроводів часто спостерігаються неусталені режими їх роботи. При неусталених процесах у нафтопроводах характеристики потоку нафти (тиск, швидкість, витрата рідини, температура потоку тощо) змінюються не тільки від перерізу до перерізу, але і в кожному перерізі трубо-

проводу, і залежать від часу. При неусталеній течії усі ці параметри є функціями не лише від координати перерізу  $x$ , але й від часу  $t$ : тиск  $P = P(x, t)$ , швидкість  $w = w(x, t)$ , об'ємна витрата  $Q = Q(x, t)$  тощо.

Нестационарні режими руху нафти в нафтопроводах пов'язані передусім із різноманітним технологічними операціями, що здійснюються в процесі перекачування нафти. Пуск і зупинка нафтопроводу, включення або відключення насосних агрегатів на головній або проміжній нафтоперекачувальній станції, повне або часткове відкриття запірної арматури, перемикання резервуарів, включення або відключення відводів, розрив трубопроводу тощо - усе це призводить до того, що в нафтопроводі розпочинаються зміни, які у вигляді хвиль тиску та витрати поширюються вперед і назад за потоком рідини від місця, в якому ці зміни генеруються. Дані зміни тривають в трубопроводі, зазвичай, до встановлення нового режиму транспортування, тому неусталені процеси називають ще перехідними режимами.

Густина нафти досить значна, швидкість руху становить від 1 до 2 м/с, тому потік рідини в трубопроводі має цілком відчутну інерцію, якою не можна нехтувати при здійсненні тієї чи іншої технологічної операції. Зупинка потоку нафти в трубопроводі при швидкому закритті запірної арматури, при зупинці одного чи кількох насосів призводить до стрибкоподібного зростання тиску, що може сягати кількох мегапаскалів. Підвищення тиску з великою швидкістю поширюється від місця зупинки потоку у вигляді хвилі підвищеного тиску, здатної розірвати трубу та призвести до аварії.

Найбільш характерними і поширеними прикладами перехідних процесів у магістральних нафтопроводах є гідродинамічні процеси, спричинені зупинками окремих відцентрових насосів та НПС в цілому. Відключення нафтоперекачувальної станції (НПС) або окремих насосів призводить до підвищення тиску в лінії всмоктування та до падіння тиску в лінії нагнітання. Підвищення тиску перед НПС спричинює додаткове навантаження на трубопровід, здатне викликати його пошкодження або розрив.

Для забезпечення ефективної та надійної експлуатації магістральних нафтопроводів необхідно мати як теоретичні, так і експериментальні дослідження закономірностей перехідних процесів, спричинених зупинками насосних агрегатів.

У шістдесяті-вісімдесяті роки минулого століття російські вчені присвятили ряд робіт теоретичним дослідженням закономірностей перехідних процесів у трубопроводах. Так, у роботах В'язунова Е.В., Мороза П.А., Полянської Л.В. [1,2,3] наведено результати теоретичних досліджень динаміки зміни тиску в лінійній частині трубопроводів при перехідних процесах, спричинених зупинками насосних агрегатів. Роботи В'язунова Е.В., Голосовкера Б.І., Перевозишкова С.І. [4,5,6] містять результати теоретичних досліджень закономірностей перехідних процесів в трубопровідних комунікаціях НПС при зупинках і запусках одного чи кількох насосних агрегатів.

У той же час слід вказати на недостатнє підтвердження закономірностей гідродинаміки перехідних процесів у нафтопроводах резуль-

татами лабораторних та промислових експериментів. Експериментальним дослідженням гідродинамічних процесів у діючому нафтопроводі присвячено роботу [7], опубліковану в 1964 році. Досліди проводились на одному із російських нафтопроводів із номінальним діаметром 500 мм, нафтоперекачувальні станції якого оснащені нафтовими насосами старого параметричного ряду. Результати цих експериментів дещо застаріли і їх не можна застосовувати для аналізу закономірностей зміни тиску при зупинці сучасних насосних агрегатів на вітчизняних нафтопроводах.

Наведене вище визначає актуальність та важливість експериментальних досліджень закономірностей перехідних процесів у нафтопроводах.

**Мета і задачі досліджень.** Метою роботи є встановлення експериментальним шляхом на діючому магістральному нафтопроводі закономірностей гідродинамічних процесів, спричинених зупинками насосних агрегатів.

У процесі досліджень вирішувались такі задачі:

- 1) виявлення закономірностей зміни обертової частоти, тиску і подачі нафтових насосів серії НМ у часі при їх зупинці;
- 2) встановлення закономірностей зміни тиску транспортованої рідини на вході і виході НПС при зупинці одного і кількох насосних агрегатів;
- 3) виявлення закономірностей поширення хвиль підвищеного тиску у лінійній частині трубопроводу при зупинці насосних агрегатів.

**Об'єкт дослідження** – магістральні нафтопроводи, нафтоперекачувальні станції яких оснащені нафтовими відцентровими насосами.

**Предмет дослідження** – неусталені гідродинамічні процеси, що виникають при зупинках насосних агрегатів.

**Методи дослідження** – проведення вимірювання параметрів руху нафти в магістральних нафтопроводах, математична обробка результатів з використанням комп'ютерних технологій.

Промислові експерименти гідродинаміки перехідних процесів виконані на одному із вітчизняних нафтопроводів номінальним діаметром 700 мм і довжиною 400 км. На трасі нафтопроводу працюють чотири НПС, оснащені сучасними нафтовими насосами серії НМ. Також тут передбачено 14 контрольних пунктів (КП), оснащених сучасними засобами контролю тиску рідини. Для вимірювання тиску транспортованої рідини використовували сучасні давачі тиску типу Mikrotran F-R Fishers з класом точності 0,075-0,1.

При швидкоплинних перехідних процесах у нафтопроводі вимірювання тиску нафти проводилось щосекунди. Розрахункову схему експлуатаційної ділянки нафтопроводу зображено на рисунку 1.

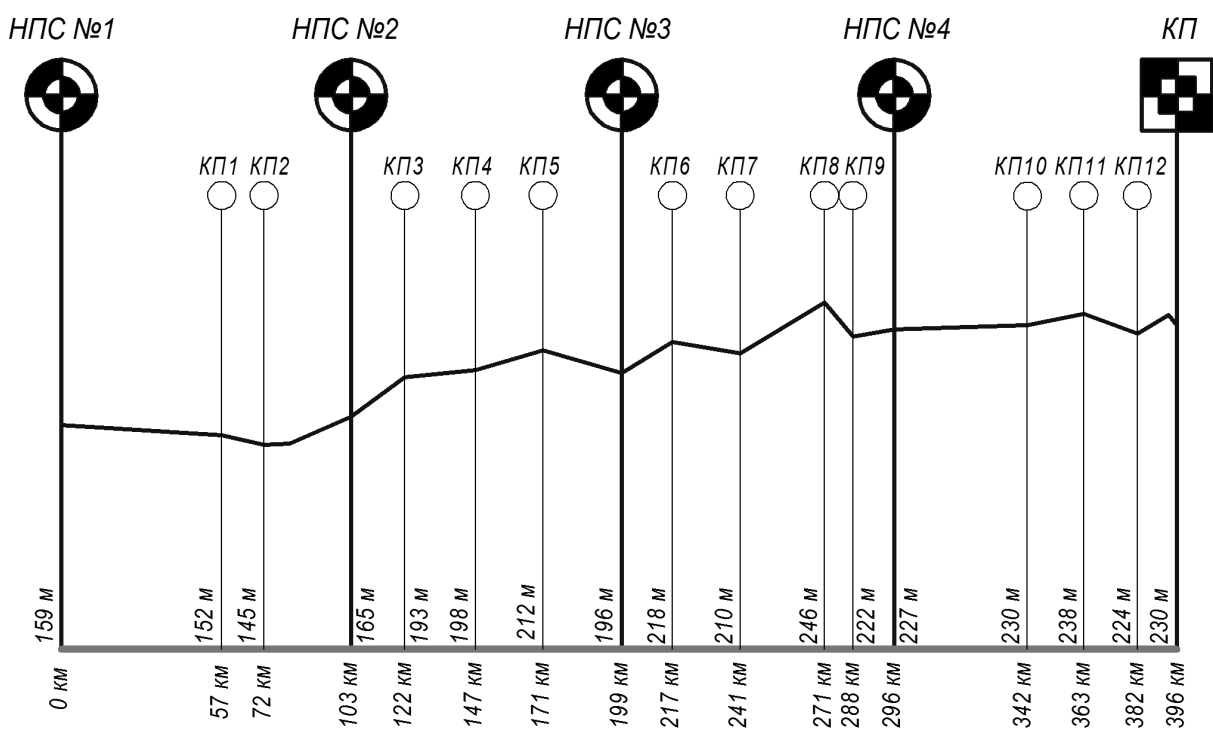


Рисунок 1 – Розрахункова схема експлуатаційної ділянки нафтопроводу

Під час проведення промислових експериментів густина транспортованої нафти змінювалась у діапазоні від 866 до 875 кг/м<sup>3</sup>. Коефіцієнт кінематичної в'язкості нафти змінювався від 16 до 27 сСт.

Для того, щоб проаналізувати перевантаження лінійної частини нафтопроводу за тиском, необхідно мати закон зміни тиску на вході і виході НПС, де відбулася зупинка одного чи кількох насосних агрегатів. У роботі [4] розроблено наближений метод побудови лінії “вибігу” НПС, який може бути використаний лише для орієнтовних розрахунків. У зазначеному методі не враховані демпфуючі властивості трубопроводу, тому метод дає завищені значення крутизни фронту хвилі тиску.

Нами виконано експериментальні дослідження закономірностей зміни обертової частоти насосного агрегату у часі в процесі його зупинки. Дослідження проведено для нафтового насоса марки НМ 3600-230, який широко застосовуються на вітчизняних нафтопроводах. Насос оснащений змінним ротором на номінальну подачу 1800 м<sup>3</sup>/год. У момент зупинки параметри роботи насоса були номінальними. Рисунки 2 і 3 ілюструють зміну обертової частоти насосного агрегату при його зупинці та результати математичного моделювання одержаних закономірностей.

Із рисунків 2 і 3 випливає, що процес зупинки насосного агрегату триває до 80 с. За цей час обертова частота насоса зменшується від 3000 до 120 об/хв. Аналіз експериментальних даних засвідчив, що процес зменшення обертової частоти насоса можна розбити на два етапи. Перший етап триває до 30 с (рис. 2) характеризується більш інтенсивним зменшенням обертової частоти, на другому етапі (рис. 3),

обертова частота насоса зменшується повільніше. Зміну обертової частоти насоса у часі для кожного етапу можна достовірно описати експоненціальною функцією (об/хв):

- у діапазоні часу від 0 до 30 с

$$n = 3000 \cdot \exp(-0,0550 \cdot t), \quad (1)$$

- у діапазоні часу від 30 до 80 с

$$n = 1458 \cdot \exp(-0,0314 \cdot t). \quad (2)$$

Результати експериментальних досліджень зміни обертової частоти насосного агрегату в процесі його зупинки дають змогу визначити момент інерції конкретного насоса. Для цього застосовано рівняння руху насосного агрегату в процесі його відключення [4]

$$I \cdot \frac{d\omega}{dt} + M = 0, \quad (3)$$

де  $I$  – момент інерції обертових мас насосного агрегату;

$\omega$  – кутова швидкість вала насоса;

$M$  – момент опору, що залежить від кутової швидкості вала насоса.

З урахуванням зв'язку між кутовою швидкістю  $\omega$  і обертовою швидкістю, вираженою в обертах за хвилину  $n$ , розв'язок рівняння (3) відносно моменту інерції насосного агрегату набуває вигляду

$$I = - \frac{30 \cdot M}{\pi \cdot \frac{dn}{dt}}. \quad (4)$$

Після диференціювання рівняння (1), одержано

$$\frac{dn}{dt} = -165 \cdot \exp(-0,0550 \cdot t). \quad (5)$$

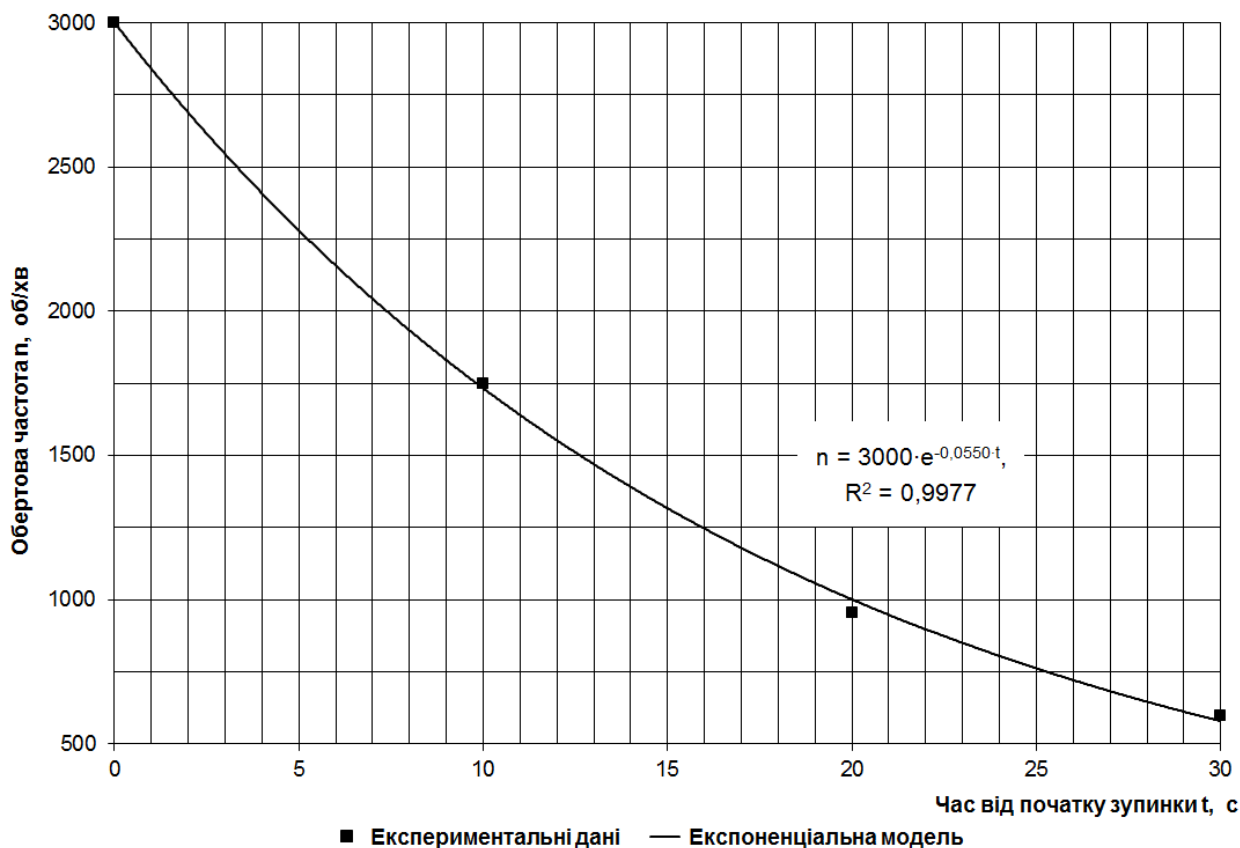


Рисунок 2 – Зміна обертової частоти насосного агрегата при його зупинці за результатами експерименту (етап 1)

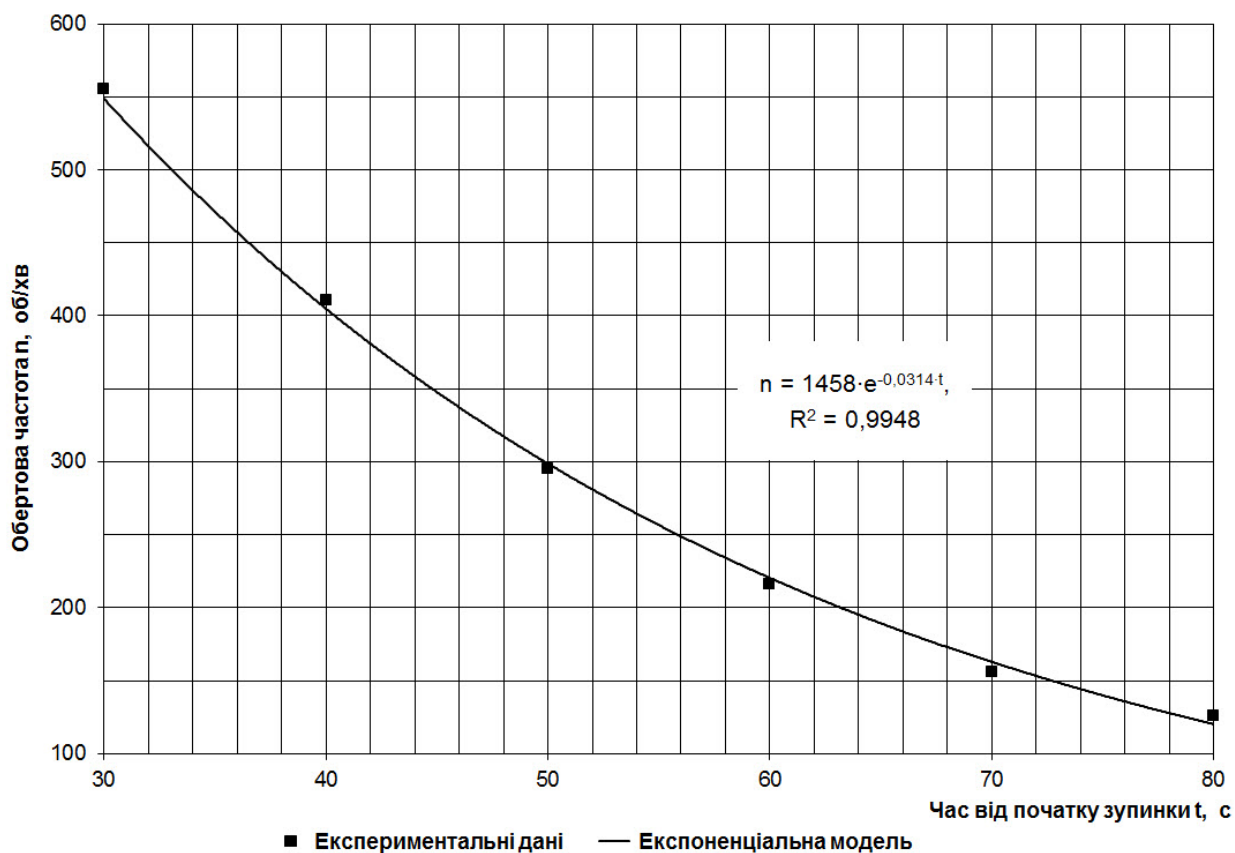


Рисунок 3 - Зміна обертової частоти насосного агрегата при його зупинці за результатами експерименту (етап 2)

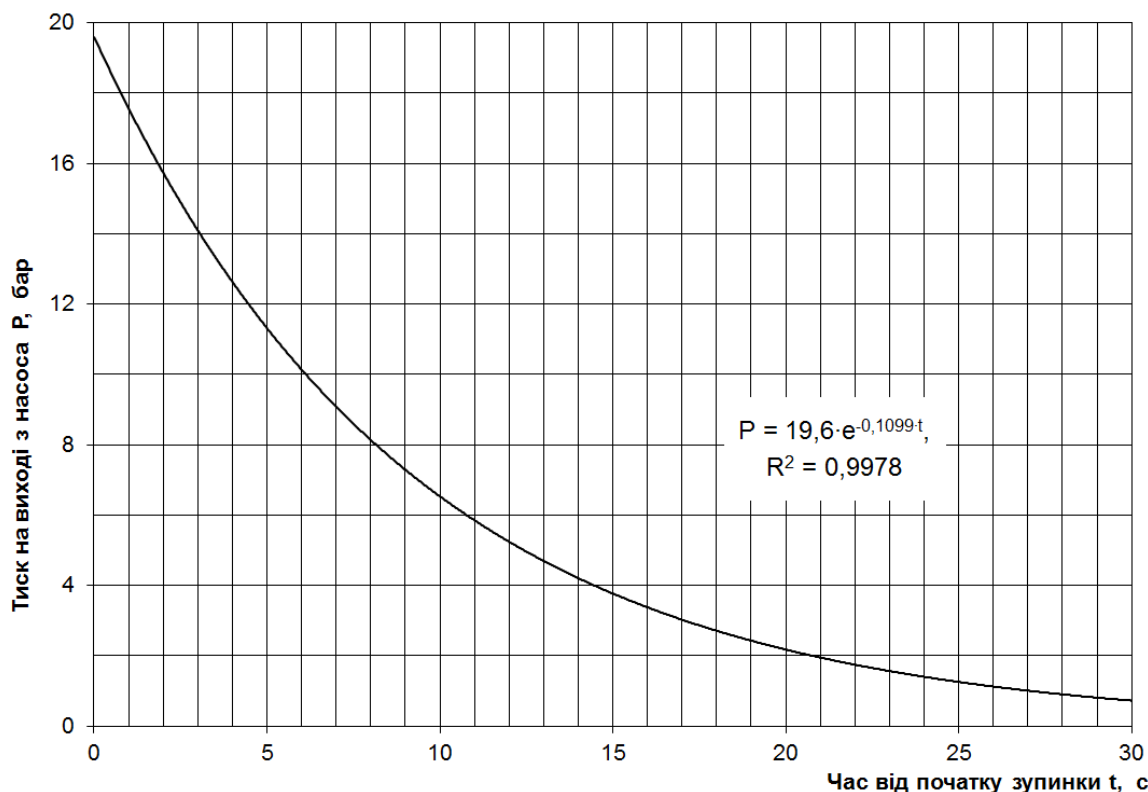


Рисунок 4 – Зміна тиску, створеного насосом, у часі для першого етапу зупинки насосного агрегата

Задано час  $t = 10$  с від початку зупинки насосного агрегату НМ 3600-230 зі змінним ротором на номінальну продуктивність  $1800 \text{ м}^3/\text{год}$ . Із рівняння (5), одержано

$$\left. \frac{dn}{dx} \right|_{x=10} = -95.$$

За формулою (1) обчислено обертову частоту насоса  $n = 1730$  об/хв у заданий момент часу зупинки. За формулами подібності відцентрових машин знайдено напір і подачу насоса. Визначено потужність насоса у зазначений момент його зупинки

$$N = 294 \text{ кВт}.$$

Момент опору на валу насосного агрегату для заданого моменту зупинки насосного агрегату знайдено за формулою

$$M = \frac{30 \cdot N}{\pi \cdot n}, \quad (6)$$

$$M = \frac{30 \cdot 294000}{\pi \cdot 1730} = 1623 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

За формулою (6) визначено момент інерції обертових мас насосного агрегату НМ 3600-230 зі змінним ротором на номінальну продуктивність  $1800 \text{ м}^3/\text{год}$

$$I = 163 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Аналогічно за результатами промислових експериментів визначено моменти інерції інших типів насосних агрегатів, що працюють на ділянці нафтопроводу, схема якої наведена на рисунку 1.

З використанням теорії подібності відцентрових машин за наявності закономірності зміни обертової частоти насоса визначено зміну у часі його тиску (за густини  $870 \text{ кг}/\text{м}^3$ ) та об'ємної подачі. Одержані результати щодо зміни тиску для першого етапу зупинки насоса, для якого справедливі закони подібності відцентрових машин, наведено на рисунку 4.

Виконано математичне моделювання графічної залежності на рисунку 4. У результаті одержано таку аналітичну залежність тиску насоса (бар) від часу, відрахованого від початку зупинки (с)

$$P = 19,6 \cdot \exp(-0,1099 \cdot t), \quad (7)$$

де  $19,6$  – тиск нафти, який створював насос до зупинки за робочої подачі і номінальної обертової частоти ротора.

Як бачимо із рисунка 4, протягом короткого часу (до 20 с) від початку зупинки насосного агрегату тиск, створений насосом, інтенсивно зменшується від 20 до 2 бар, далі насос перестає виконувати свою функцію збільшення тиску транспортованої рідини і перетворюється у місцевий гідравлічний опір.

Практично миттєва зміна тиску, створеного насосом, спричинює, відповідно до закону збереження енергії, раптову зміну тиску на вході і виході відповідної НПС. Якщо б насосні агрегати не мали інерції і не було б опору для зворотного перетікання рідини з нагнітального трубопроводу станції у всмоктувальний, то тиск транспортованої рідини на вході НПС після зупинки насосного агрегату збільшився б миттєво на величину [8]

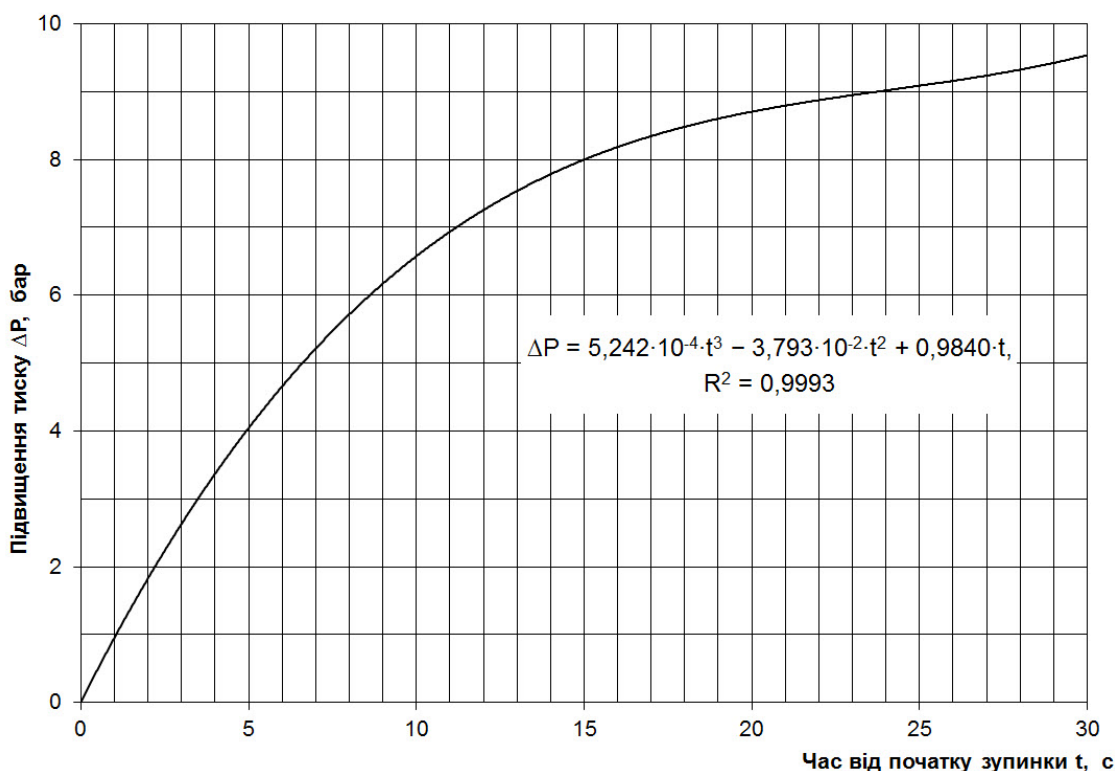


Рисунок 5 – Залежність підвищення тиску на вході НПС від часу, відрахованого від початку зупинки насосного агрегата

$$\Delta P_{ex} = 0,5 \cdot P_0, \quad (8)$$

де  $P_0$  – тиск нафти, який створював насос до зупинки за робочої подачі і номінальної обертової частоти ротора.

На виході НПС тиск транспортованої рідини після зупинки насосного агрегату миттєво зменшився б на аналогічну величину

$$\Delta P_{вих} = 0,5 \cdot P_0. \quad (9)$$

Такому перебігу процесу перешкоджає інерція обертових мас насосних агрегатів, а також наявність гідравлічного опору для зворотного перетікання рідини. Цей опір представлений передусім зворотним клапаном. Таким чином, стрибкоподібна зміна тиску на всмоктуванні зупиненої насосної станції – це теоретичне максимально можливе зростання тиску і йому відповідають максимальні перевантаження під час перехідного процесу [1].

Експерименти засвідчили, що зміни тиску на вході і виході НПС після зупинки насосного агрегату відбуваються не миттєво, а протягом 20 с. При зупинці насоса, що досліджувався, одержано таку закономірність підвищення тиску на вході НПС (бар) від часу (с):

$$\Delta P_{ex} = 9,8 \cdot [1 - \exp(-0,1099 \cdot t)]. \quad (10)$$

Графічну залежність підвищення тиску на вході НПС під час першого етапу зупинки насосного агрегату ілюструє рисунок 5.

Із рисунка 5 видно, що протягом 20 с після зупинки насосного агрегата підвищення тиску транспортованої рідини на вході НПС практично досягає величини, що відповідає формулі (8), тобто половині тиску, який створював на-

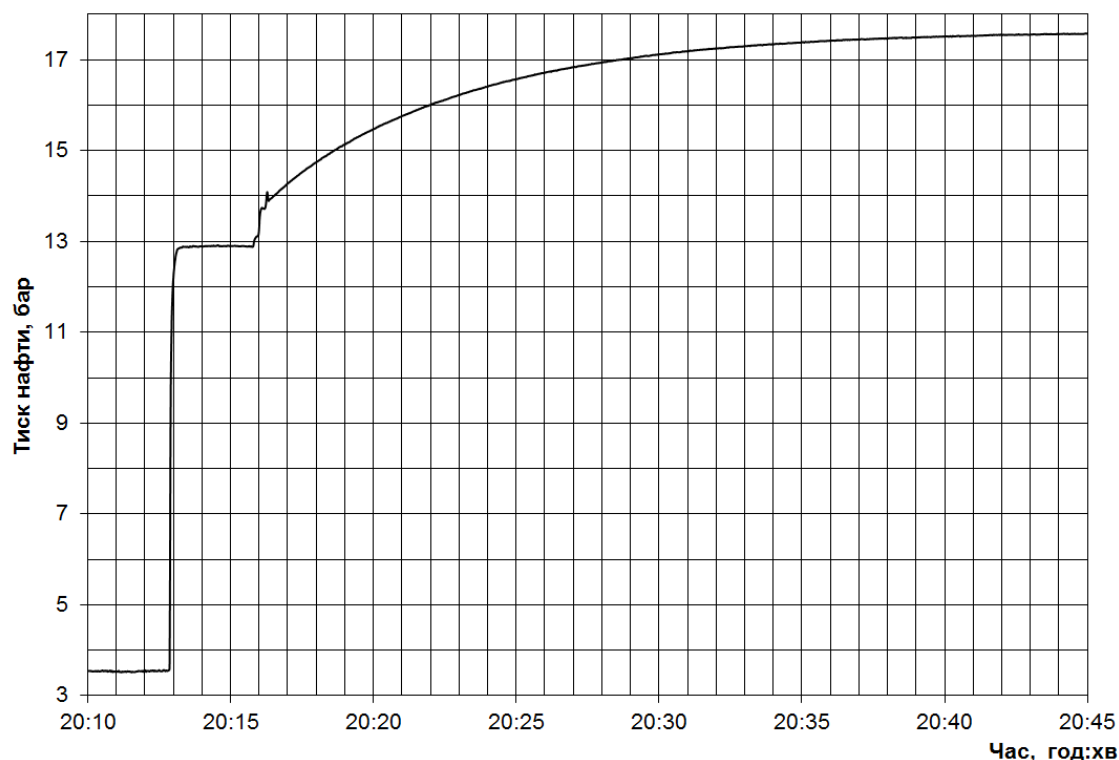
сос до зупинки. Залежність підвищення тиску на вході НПС (бар) від часу, відрахованого від початку зупинки насосного агрегата (с), можна адекватно описати поліноміальною функцією

$$\Delta P = 5,242 \cdot 10^{-4} \cdot t^3 - 3,793 \cdot 10^{-2} \cdot t^2 + 0,9840 \cdot t. \quad (11)$$

Для проведення експериментальних досліджень перехідних процесів у магістральному нафтопроводі, розрахункову схему якого наведено на рисунку 1, вибрано усталений режим роботи, за якого на кожній із чотирьох НПС працювало по одному магістральному насосу. Витрата нафти в нафтопроводі до зупинки насосного агрегату становила 1690 м<sup>3</sup>/год.

О 20 год 13 хв була здійснена зупинка насосного агрегата на НПС4. У результаті протягом 10-20 с, тобто практично миттєво, тиск нафти на вході НПС4 збільшився із величини 3,5 бар до значення 12,9 бар (див. рисунок 6). Після цього протягом 25-30 хв спостерігалось повільне підвищення вхідного тиску нафти до значення 17,5 бар. Це значення, як показали розрахунки, добре корелюється із прогнозованим тиском нафти на вході НПС4 для нового усталеного режиму роботи, що відповідає роботі нафтопроводу при відключеній НПС4.

До зупинки фактичний тиск насоса становив 19,7 бар. Стрибкоподібне підвищення тиску нафти на вході НПС4 (рис. 6) під час експерименту становило  $\Delta P_{ex\phi} = 9,4$  бар. Це значення близьке до теоретично очікуваного підвищення тиску нафти  $\Delta P_{ex} = 9,8$  бар згідно із формулою (8).



**Рисунок 6 – Зміна тиску нафти на вході НПС4 при зупинці насосного агрегата за результатами експерименту (витрата нафти до зупинки 1689 м<sup>3</sup>/год)**

Відповідно до результатів теоретичних досліджень, імпульс підвищеного тиску, що утворився на вході НПС, де відбулась зупинка насосного агрегату, зі швидкістю звуку у рідині у вигляді хвилі підвищеного тиску поширюється до попередньої НПС (за рухом нафти) і далі до початку експлуатаційної ділянки нафтопроводу. Швидкість розповсюдження хвилі підвищеного тиску в нафтопроводі визначається за формулою [9]

$$c = \frac{1}{\sqrt{\frac{\rho}{K} + \frac{\rho \cdot D}{\delta \cdot E}}}, \quad (12)$$

де  $\rho$  – густина транспортованої рідини за умов перекачування;

$K$  – модуль пружності транспортованої рідини;

$D$  – внутрішній діаметр трубопроводу;

$\delta$  – товщина стінки труби.

$E$  – модуль пружності трубної сталі.

Для умов промислового експерименту швидкість поширення хвилі підвищеного тиску в нафтопроводі, розрахована за формулою (11) з використанням загальноприйнятих довідкових даних, мала становити  $c = 995$  м/с.

Для прикладу на рисунку 7 наведено результати вимірювання змін тиску нафти на КП8, який розміщений на ділянці нафтопроводу між НПС3 і НПС4, на якій відбулось відключення насосного агрегату. Зазначений контрольний пункт знаходиться на відстані 54 км від місця виникнення хвилі підвищеного тиску.

Рисунок 8 характеризує картину зміни тиску нафти при перехідному процесі на вході НПС3, яка розміщена на відстані 97 км від джерела збурення. На рисунку 9 зображено результати вимірювання зміни тиску при перехідному процесі на виході НПС2, яка розміщена на 193 км від місця виникнення збурення.

Рисунки 7-9 виявили однакову тенденцію до зміни тиску нафти під час перехідного процесу. У момент підходу хвилі підвищеного тиску до контрольного пункту спостерігалось стрибкоподібне зростання тиску нафти, після цього тиск нафти у даному перерізу трубопроводу протягом 25-30 хв повільно зростає, і далі стабілізувався на величині, що відповідає новому усталеному режиму експлуатації нафтопроводу. Чим далі від місця збурення знаходився контрольний пункт, тим меншою була величина стрибкоподібного підвищення тиску транспортованої нафти внаслідок затухання перехідного процесу, спричиненого гідравлічними втратами енергії.

За дослідними даними, що наведені на рисунках 7-9, побудовано графічну залежність величини стрибкоподібного підвищення тиску нафти при перехідному процесі від відстані по трасі трубопроводу до місця відключення насоса (рисунок 10). Виконано математичне моделювання одержаної графічної залежності засобами Microsoft Excel.

Встановлено, що залежність величини стрибкоподібного підвищення тиску нафти від відстані до місця відключення насоса можна достовірно описати експоненціальною залежністю

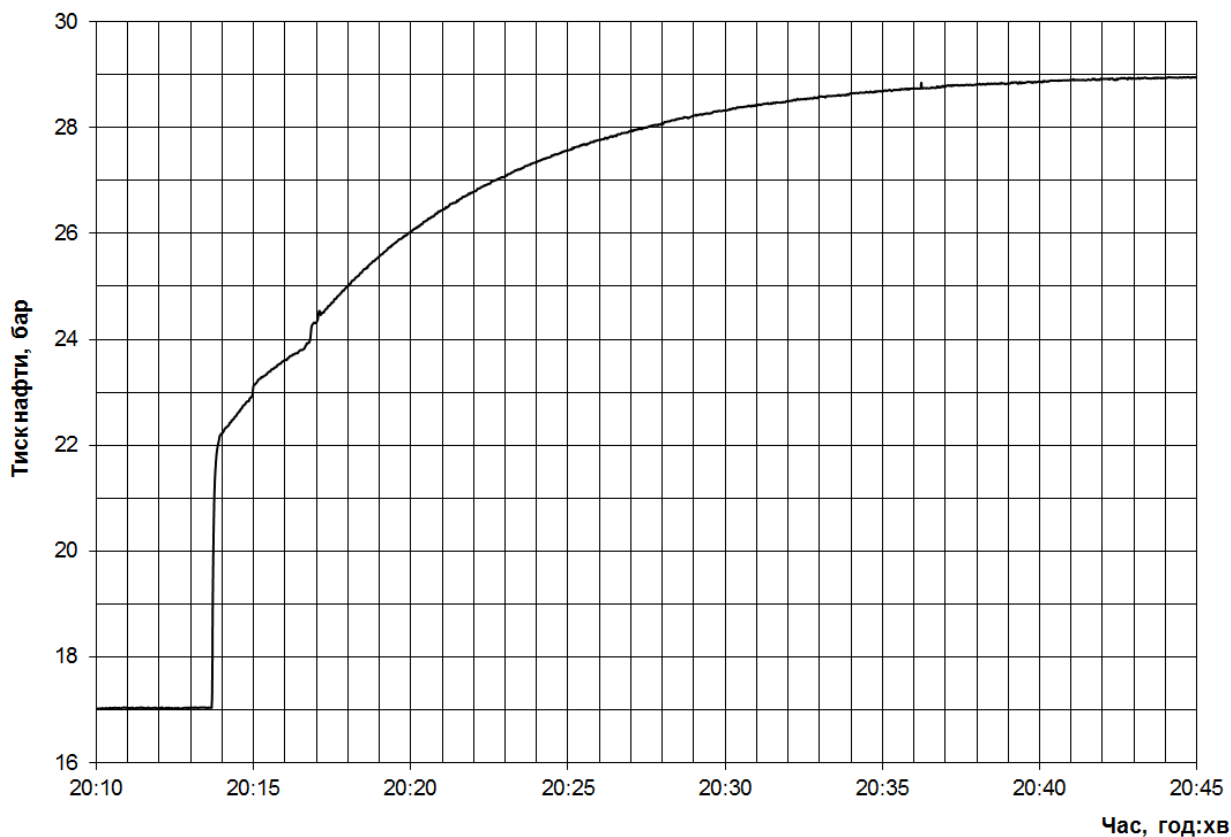


Рисунок 7 – Зміна тиску нафти на відстані 54 км від НПС4 при зупинці насосного агрегата за результатами експерименту (витрата нафти до зупинки 1689 м<sup>3</sup>/год)

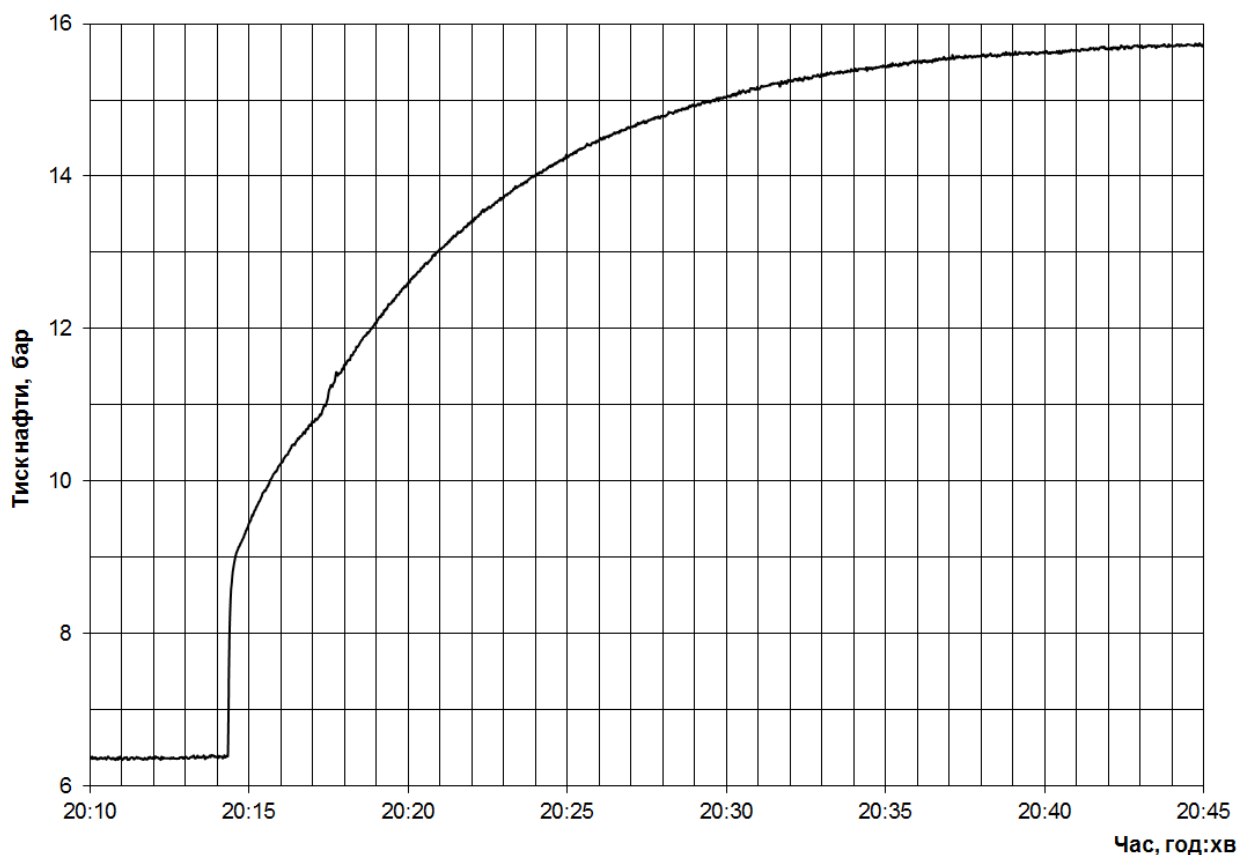


Рисунок 8 – Зміна тиску нафти на відстані 97 км від НПС4 (на вході НПС3) при зупинці насосного агрегата за результатами експерименту (витрата нафти до зупинки 1689 м<sup>3</sup>/год)



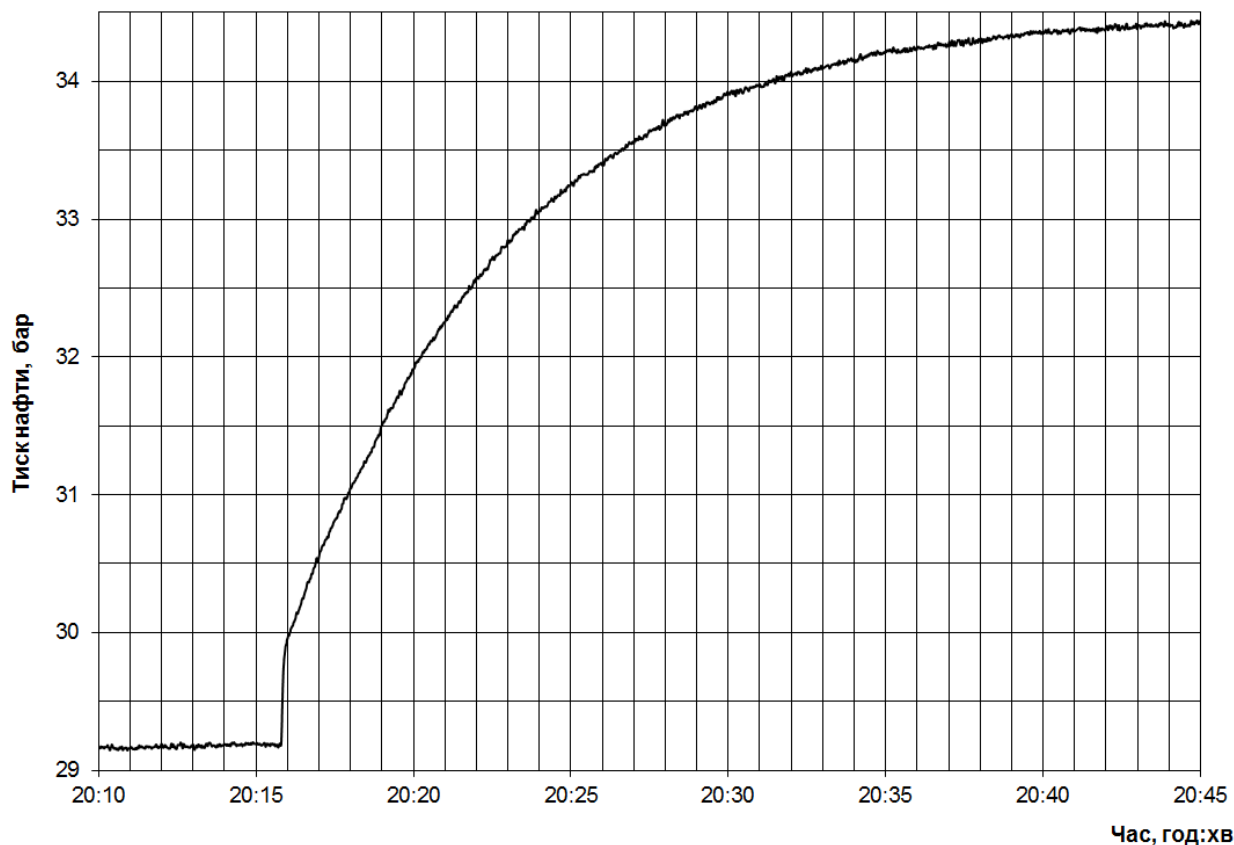


Рисунок 9 – Зміна тиску нафти на відстані 193 км від НПС4 (на виході НПС2) при зупинці насосного агрегата за результатами експерименту (витрата нафти до зупинки 1689 м<sup>3</sup>/год)

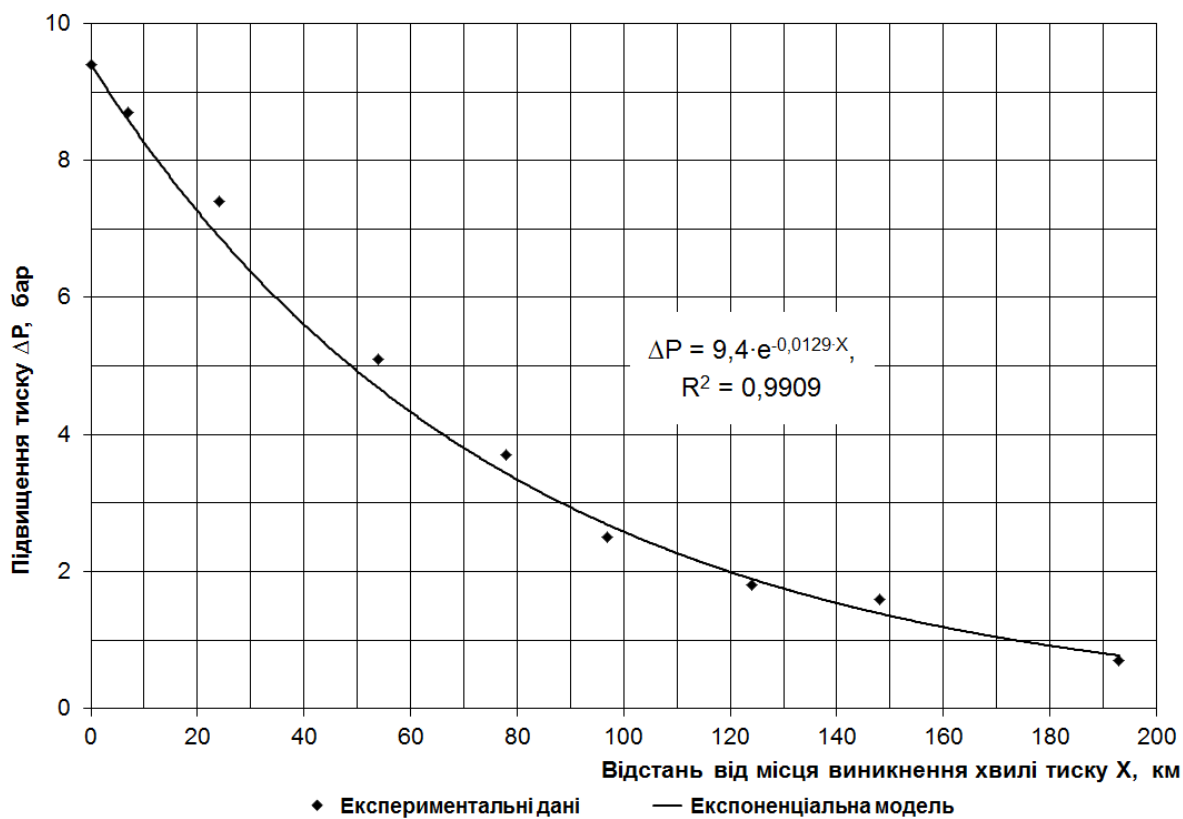
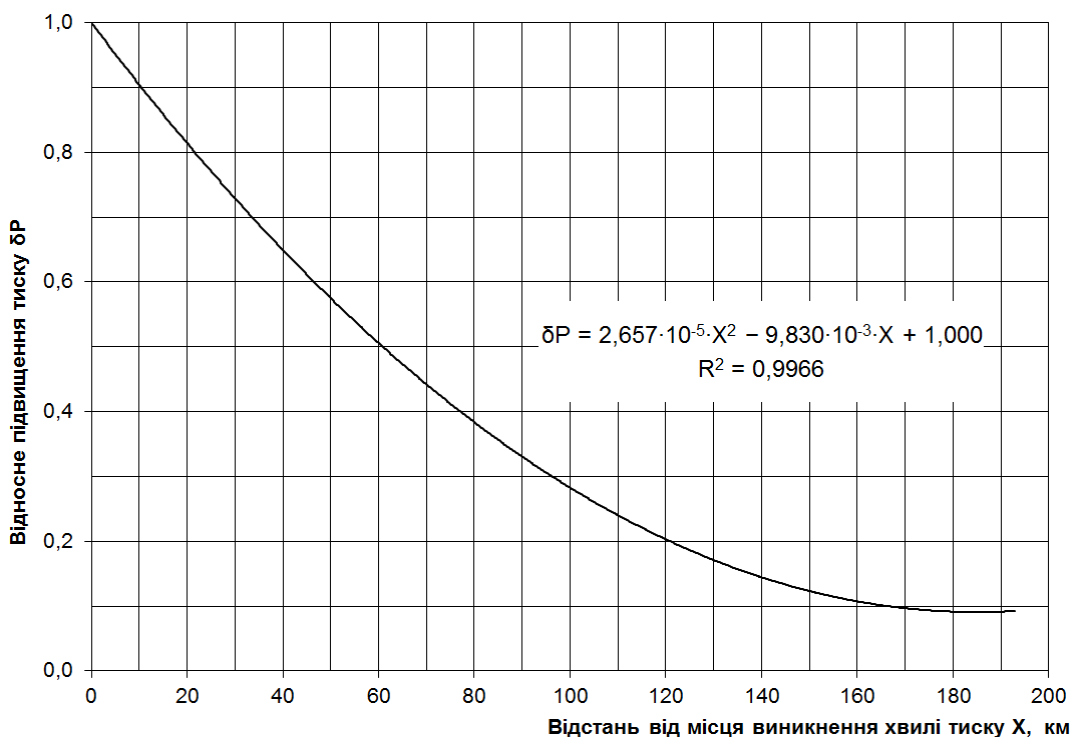


Рисунок 10 – Залежність величини стрибкоподібного підвищення тиску нафти від відстані до НПС4, де зупинили насосний агрегат за результатами експерименту (витрата нафти до зупинки 1689 м<sup>3</sup>/год)



**Рисунок 11 – Залежність величини відносного підвищення тиску нафти від відстані до НПС4, де зупинили насосний агрегат за результатами експерименту (витрата нафти до зупинки 1689 м<sup>3</sup>/год)**

$$\Delta P = \Delta P_n \cdot \exp(-K_z \cdot x), \quad (13)$$

де  $\Delta P_n$  – підвищення тиску на вході НПС, де відбулася зупинка одного або кількох насосів;

$K_z$  – коефіцієнт затухання хвилі підвищеного тиску;

$x$  – відстань по трасі нафтопроводу від місця виникнення збурення тиску до довільної точки траси.

Для досліджу, результати якого проаналізовані вище, одержано таку залежність величини стрибкоподібного підвищення тиску нафти (бар) від відстані до місця відключення насоса (км)

$$\Delta P = 9,4 \cdot \exp(-0,0129 \cdot x). \quad (14)$$

Для характеристики інтенсивності затухання хвилі підвищення тиску уведемо поняття відносного (щодо максимального значення) стрибкоподібного підвищення тиску нафти у довільному перерізі трубопроводу. Для наведеного вище досліджу залежність відносного підвищення тиску нафти від відстані до місця відключення насоса (км) можна достовірно описати поліноміальною функцією (рисунок 11).

$$\delta_p = 1 - 9,830 \cdot 10^{-3} \cdot x + 2,657 \cdot 10^{-5} \cdot x^2. \quad (15)$$

Опрацювання результатів експериментальних досліджень, наведених вище, дали змогу встановити фактичну швидкість поширення хвилі підвищеного тиску нафти в нафтопроводі. Вона виявилась рівною 1110 м/с, що на 12% перевищує значення, розраховане за формулою (12).

У процесі експлуатації магістральних нафтопроводів нерідко спостерігаються ситуації, за

яких після зупинки насосного агрегату відразу здійснюється запуск насосного агрегату на тій же НПС.

Для проведення відповідного експерименту вибрано усталений режим експлуатації нафтопроводу, за якого на НПС1 і НПС3 працювало послідовно по два магістральні насоси, а на НПС2 і НПС4 працювало по одному магістральному насосу. Витрата нафти в нафтопроводі до зупинки насосного агрегату становила 2096 м<sup>3</sup>/год.

О 6 год 31 хв 30 с була здійснена зупинка насосного агрегату на НПС4. Через 50 с запущений в експлуатацію інший насос на тій же НПС.

Результати вимірювання зміни тиску нафти на вході НПС4 при перехідному процесі характеризує рисунок 12. Практично миттєво тиск нафти на вході НПС4 збільшився із величини 14,4 бар до значення 22,7 бар (див. рисунок 12). Після цього через 10 с спостерігалось миттєве зниження вхідного тиску нафти до значення 14,4 бар. Далі протягом 25-30 хв тиск нафти повільно зменшувався і стабілізувався на величині 13 бар, що корелюється із тиском нафти на вході НПС4 для нового усталеного режиму роботи нафтопроводу.

До зупинки фактичний тиск насоса становив 17,2 бар. Стрибокподібне підвищення тиску нафти на вході НПС4 (рисунок 12) під час експерименту становило  $\Delta P_{ex\phi} = 8,3$  бар. Це значення практично відповідає теоретично очікуваному підвищенню тиску нафти  $\Delta P_{ex} = 8,6$  бар відповідно до формули (8).

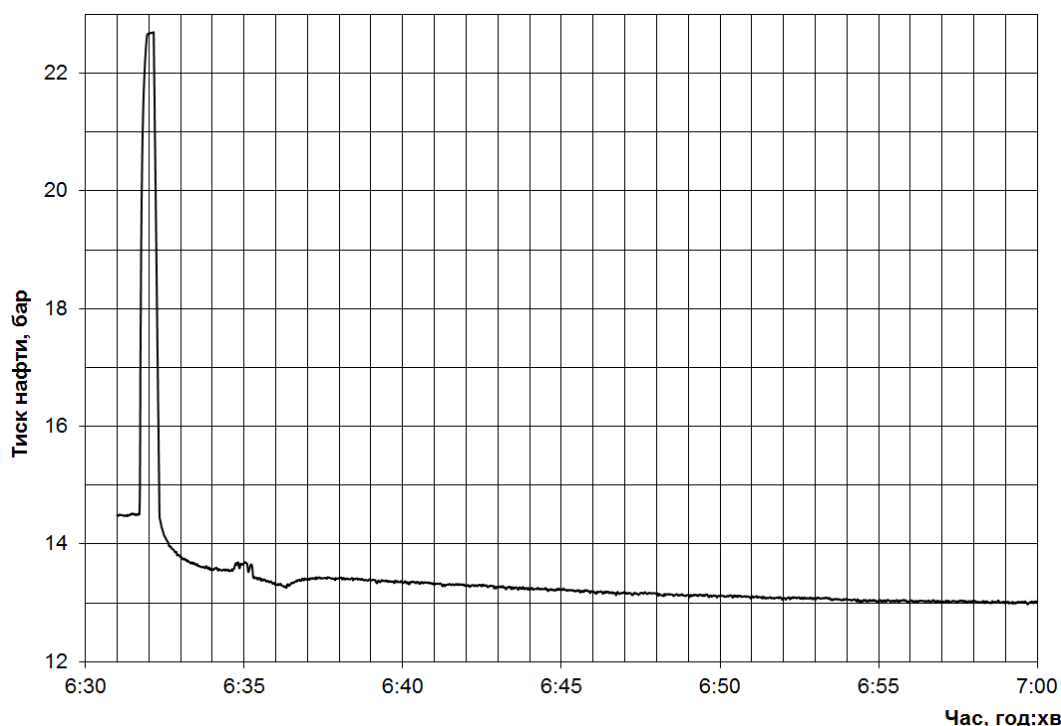


Рисунок 12 – Зміна тиску нафти на вході НПС4 при зупинці і подальшому запуску насосного агрегата за результатами експерименту (витрата нафти до зупинки 2096 м<sup>3</sup>/год)

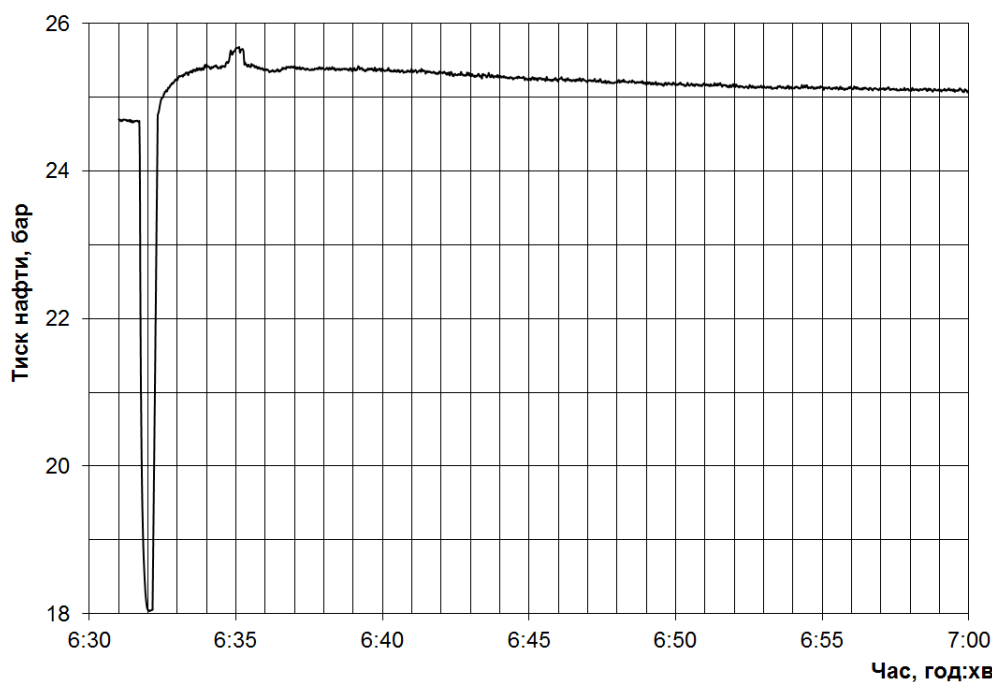


Рисунок 13 – Зміна тиску нафти на виході НПС4 при зупинці і подальшому запуску насосного агрегата за результатами експерименту (витрата нафти до зупинки 2096 м<sup>3</sup>/год)

Динаміку зміни тиску при перехідному процесі на виході НПС4 характеризує рисунок 13. Із рисунка 13 видно, що після зупинки насосного агрегату тиск на виході НПС4 протягом 10 с зменшився з 24,7 бар до значення 18 бар, а після запуску насоса в експлуатацію практично миттєво зріс до величини 25 бар. Після цього протягом 25-30 хв тиск нафти повільно стабілізувався на величині 25,2 бар, що відповідає прогнозованому тиску на виході НПС4 для нового усталеного режиму роботи нафтопроводу.

За дослідними даними побудовано графічну залежність величини стрибкоподібного підвищення тиску нафти при перехідному процесі від відстані по трасі трубопроводу до місця відключення насоса (рисунок 14). Виконано математичне моделювання одержаної графічної залежності засобами Microsoft Excel. Встановлено, що залежність величини стрибкоподібного підвищення тиску нафти від відстані до місця відключення насоса також можна достовірно

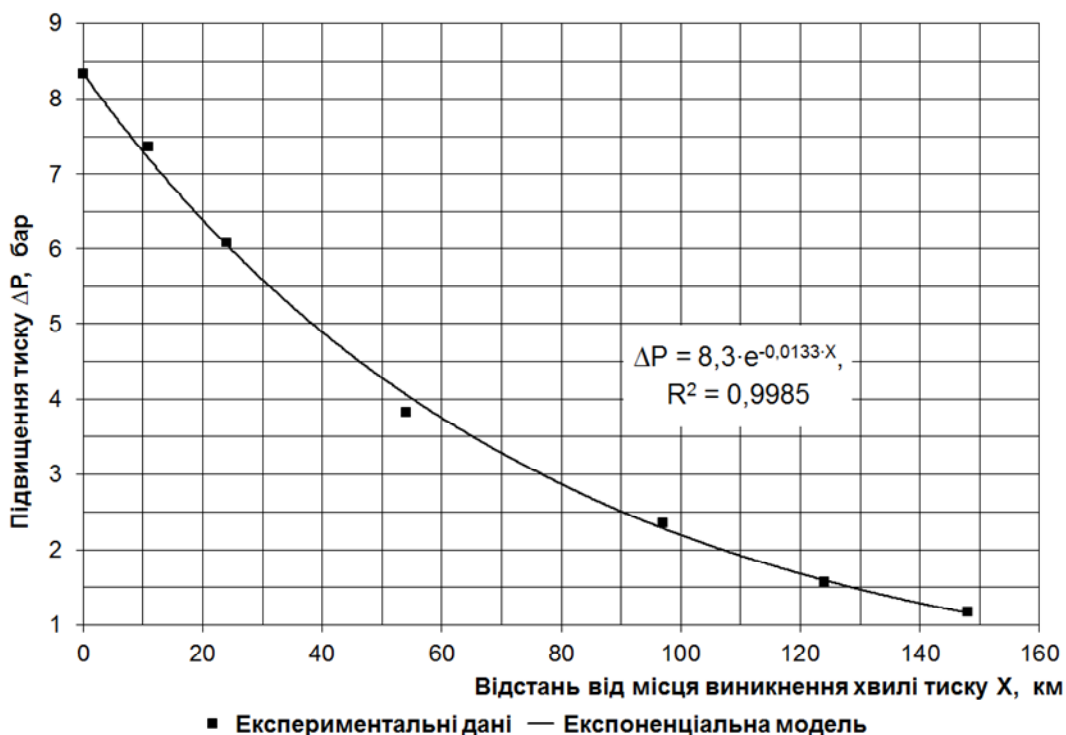


Рисунок 14 – Залежність величини стрибкоподібного підвищення тиску нафти від відстані до НПС4, де відбулись зупинка і подальший запуск насоса за результатами експерименту (витрата нафти до зупинки 2096 м<sup>3</sup>/год)

описати експоненціальною залежністю вигляду (13)

$$\Delta P = 8,3 \cdot \exp(-0,0133 \cdot x). \quad (16)$$

У формулі (16) значення коефіцієнта затухання хвилі тиску при перехідному процесі дещо відрізняється від величини, одержаної у попередньому досліді. Це відповідає теоретичним розробкам, які встановили залежність даного коефіцієнта від фізичних властивостей транспортованої рідини і параметрів режиму її руху в трубопроводі [3].

У практиці експлуатації нафтопроводів можливі випадки одночасної зупинки не одного, а кількох насосних агрегатів. На нафтоперекачувальних станціях нафтопроводу, на якому проводилися експерименти, можуть послідовно працювати не більше двох магістральних насосних агрегатів.

Вимірювання тиску проведені для усталеного режиму експлуатації нафтопроводу, при якому на НПС1 і НПС3 працювало послідовно по два насоси, а на інших НПС – по одному магістральному насосу. Об'ємна витрата нафти в нафтопроводі до зупинки становила 2083 м<sup>3</sup>/год.

О 18 год 59 хв 30 с відбулась повна зупинка НПС3, тобто одночасна зупинка двох послідовно працюючих насосів. З метою запобігання виникненню значних перевищень тиску протягом кількох хвилин були здійснені зупинки по одному насосу на НПС1 і НПС4.

Зміну тиску під час перехідного процесу на вході зупиненої НПС3 характеризує рисунок 15. Із рисунка 15 видно, що протягом 10-20 с тиск нафти на вході НПС3 збільшився із вели-

чини 4,5 бар до значення 25,5 бар. Після цього протягом 30-35 хв спостерігалися складні зміни тиску, величина яких є результатом накладання кількох хвиль тиску, спричинених відключенням насосів на інших НПС. Далі тиск нафти стабілізувався на значенні 20 бар, що відповідає тиску нафти на вході НПС3 для нового усталеного режиму роботи нафтопроводу.

До зупинки фактичний тиск насоса становив 44,3 бар. Стрибкоподібне підвищення тиску нафти на вході НПС4 (рисунок 15) під час експерименту становило  $\Delta P_{ex,ф} = 21$  бар. Це значення близьке до теоретично очікуваного підвищення тиску нафти  $\Delta P_{ex} = 22,1$  бар згідно із формулою (8).

За дослідними даними побудовано графічну залежність величини стрибкоподібного підвищення тиску нафти при перехідному процесі від відстані по трасі трубопроводу до місця відключення насосів (рисунок 16). Виконано математичне моделювання одержаної графічної залежності засобами Microsoft Excel. Встановлено, що залежність величини стрибкоподібного підвищення тиску нафти від відстані до місця відключення насоса також можна достовірно описати експоненціальною залежністю вигляду (13)

$$\Delta P = 21 \cdot \exp(-0,0138 \cdot x). \quad (17)$$

Експериментальні дослідження перехідних процесів, спричинених зупинками насосних агрегатів, які проведені на діючому магістральному нафтопроводі, дали змогу зробити такі висновки:

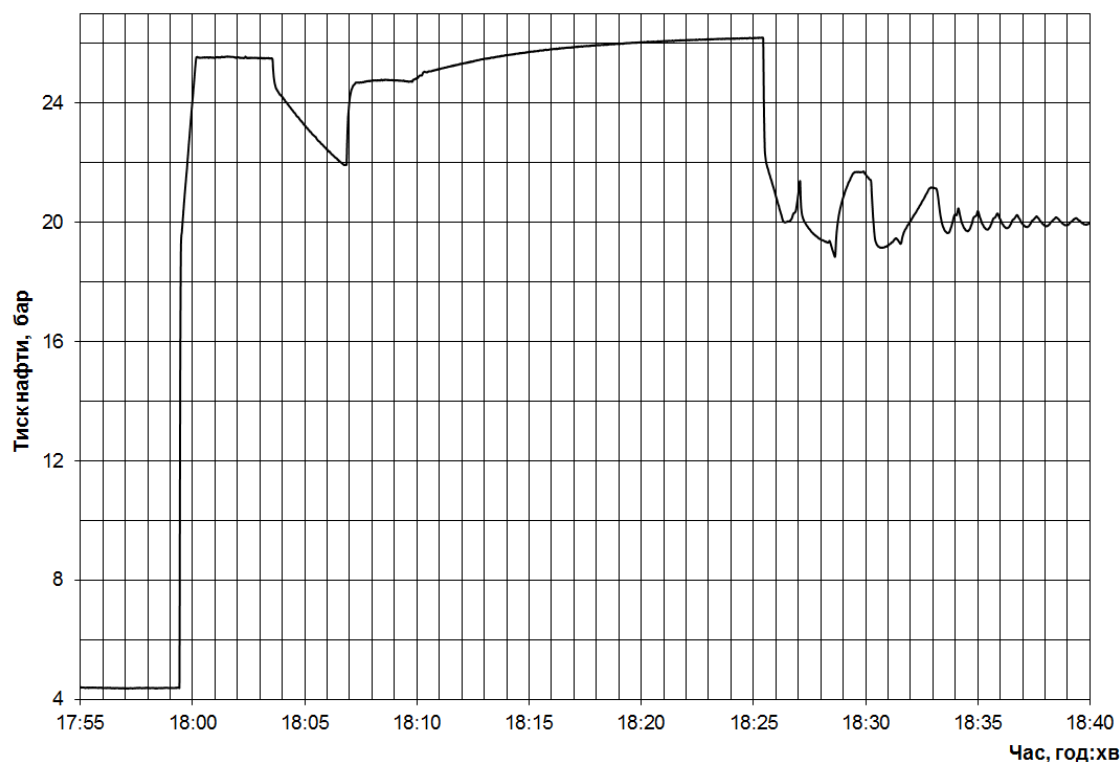


Рисунок 15 – Зміна тиску нафти на вході НПС3 при зупинці двох насосних агрегатів за результатами експерименту (витрата нафти до зупинки 2083 м<sup>3</sup>/год)

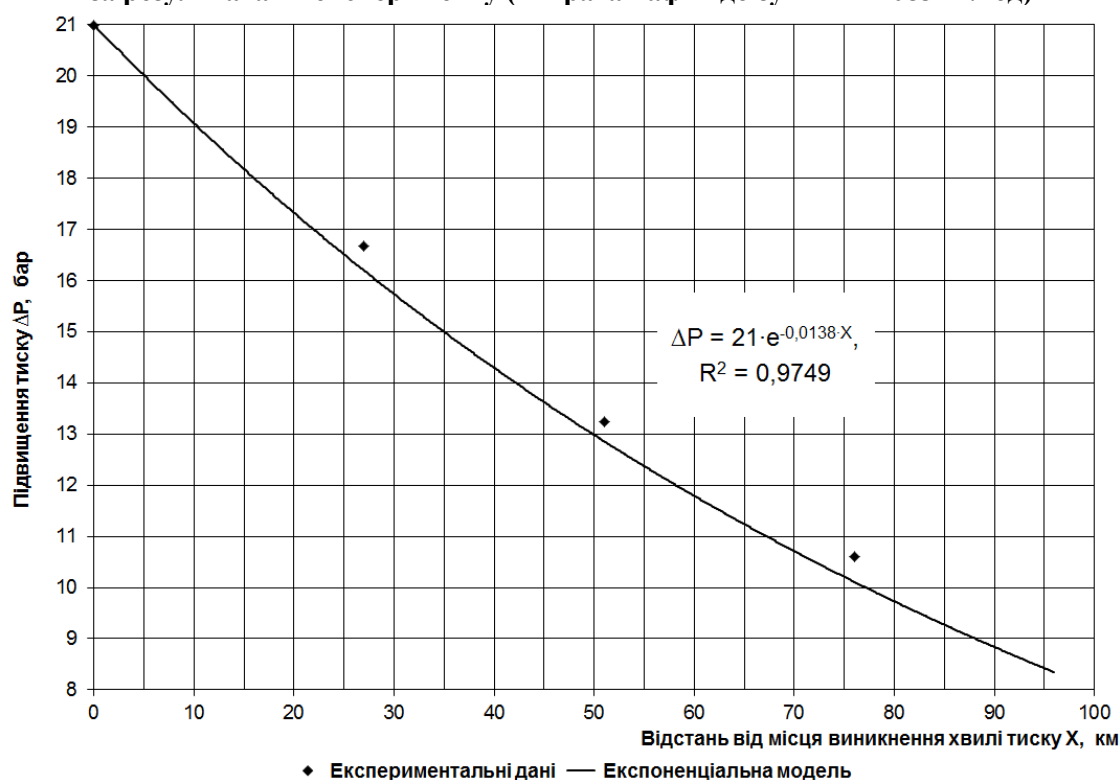


Рисунок 16 – Залежність величини стрибкоподібного підвищення тиску нафти від відстані до НПС3, де зупинили два насосні агрегати за результатами експерименту (витрата нафти до зупинки 2083 м<sup>3</sup>/год)

1 Будь-яка зупинка насосного агрегата або НПС в цілому порушує усталений режим перекачування нафти і спричинює нестационарні (перехідні) гідродинамічні процеси в нафтопроводі.

2 Тривалість зупинки нафтових магістральних насосних агрегатів серії НМ становить до 80 с. Процес зупинки насосного агрегата включає два етапи, що характеризуються різною інтенсивністю зменшення обертової частоти.

ти. У кінці першого етапу тривалістю до 20 с насос витрачає 90% створеного напору і перестає виконувати свою функцію.

3 Закономірність зміни обертової частоти нафтового насоса у часі достовірно описується експоненціальною функцією.

4 Перехідні процеси характеризуються швидкоплинними змінами тиску і витрати транспортованої рідини на вході і виході кожної НПС, а також в кожній точці траси нафтопроводу.

5 При відключенні насоса (НПС) спостерігається швидке підвищення тиску на її вході і відповідне зменшення тиску на її виході. Максимальна зміна тиску становить  $\Delta P = 0,5 \cdot P_0$ , де  $P_0$  тиск насосів, що зупинилися, за витрати нафти до зупинки. Тривалість процесу швидкої зміни тиску не перевищує 10-20 с.

6 Загальна тривалість перехідних процесів залежить від геометричних характеристик ділянок трубопроводу, гідродинамічних характеристик насосів, фізичних властивостей транспортованої рідини, режимних параметрів роботи нафтопроводу.

7 За результатами експериментів встановлена фактична швидкість поширення хвилі підвищеного тиску нафти в нафтопроводі. Її величина на 12 % перевищує значення, розраховане за загальноприйнятою формулою.

8 Виявлена така тенденція до зміни тиску нафти під час перехідного процесу. У момент підходу хвилі підвищеного тиску до контрольного пункту спостерігалось стрибкоподібне зростання тиску нафти, після цього тиск нафти у даному перерізу трубопроводу протягом 25-30 хв повільно зростає, і далі стабілізувався на величині, що відповідає новому усталеному режиму експлуатації нафтопроводу.

9 Оскільки нафта є реальною рідиною і характеризується в'язкістю, амплітуда хвилі тиску при русі трубопроводом помітно зменшується, що призводить до її затухання. Залежність величини стрибкоподібного підвищення тиску від відстані до місця виникнення збурення можна достовірно описати експоненціальною залежністю. Коефіцієнт затухання хвилі підвищеного тиску залежить від геометричних характеристик ділянок трубопроводу, фізичних властивостей транспортованої рідини та режимних параметрів роботи.

Шляхом експериментальних досліджень з використанням сучасних засобів вимірювання вперше одержані закономірності гідродинамічних перехідних процесів в магістральних нафтопроводах з урахуванням специфіки насосного обладнання та технології експлуатації.

Одержані математичні моделі дають змогу достовірно прогнозувати швидкість поширення та амплітуду хвиль підвищеного тиску у трубопроводі. Це дає змогу підвищити ефективність та надійність роботи системи керування режимами роботи магістральних нафтопроводів, запобігти виникненню аварійних ситуацій.

В подальшому на основі проведених експериментів буде розроблена методика для роз-

рахунку коефіцієнта затухання хвилі підвищеного тиску залежно від режимних параметрів роботи НПС, де відбулась зупинка одного або декількох насосних агрегатів.

### Література

1 Вязунов Е.В. О перегрузках по давлению при нестационарных режимах в нефтепроводах, работающих "из насоса в насос" / Е.В. Вязунов, П.А. Мороз // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – М.: РНТС ВНИИОЭНГ. – 1966. – №1. – С. 12-15.

2 Вязунов Е.В. Переходный процесс на насосной станции магистрального нефтепровода при отключении одного из работающих насосов / Е.В. Вязунов, Б.М. Прохоров // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – М.: РНТС ВНИИОЭНГ. – 1972. – №8. – С. 16-19.

3 Мороз П.А. Нестационарные процессы в магистральном нефтепроводе при изменении режима работы насосных станций / П.А. Мороз, Л.В. Полянская // Нефтяное хозяйство. – 1965. – №5. – С. 63-68.

4 Вязунов Е.В. Приближенный метод построения зависимости давления всасывания от времени после отключения насосной станции / Е.В. Вязунов // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – М.: РНТС ВНИИОЭНГ. – 1966. – №2. – С. 14-16.

5 Вязунов Е.В. Определение крутизны фронта волн при типичных возмущениях на магистральных нефтепроводах / Е.В. Вязунов, Б.И. Голосовкер // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – М.: РНТС ВНИИОЭНГ. – 1968. – №10. – С. 3-5.

6 Перовищиков С.И. Определение изменения давления в нефтепроводах при неустановившемся течении жидкости / С.И. Перовищиков // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – М.: РНТС ВНИИОЭНГ. – 1981. – №2. – С. 6-9.

7 Мороз П.А. Экспериментальные исследования гидродинамических процессов на трубопроводе / П.А. Мороз, Галицков Н.Ф., Прохоров Б.М. // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – М.: РНТС ВНИИОЭНГ. – 1964. – №6. – С. 7-12.

8 Вязунов Е.В. Расчет быстропотекающих переходных процессов, возникающих после включения и отключения насосных агрегатов / Е.В. Вязунов // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – М.: РНТС ВНИИОЭНГ. – 1974. – №11. – С. 26-29.

9 Лурье М.В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа. – М.: Нефть и газ, 2003. – 325 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії  
12.09.13

Рекомендована до друку  
професором Грудзом В.Я.  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
д-ром техн. наук Банахевичем Ю.В.  
(ПАТ «Укртрансгаз», м. Київ)