

УДК 622.692.4

## РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У НАФТОПРОВІДІ ЗА ЗМІНИ КІЛЬКОСТІ ПРАЦЮЮЧИХ НАСОСНИХ АГРЕГАТІВ

С.Я. Григорський, М.Д. Середюк

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 727139,  
e-mail: tzn g@n un g. e d u. u a

*Шляхом опрацювання даних промислових експериментів, проведених на вітчизняному магістральному нафтопроводі, встановлено закономірності зміни тиску за перехідних процесів, викликаних зміною кількості працюючих насосних агрегатів.*

*Виявлена фактична величина стрибкоподібного підвищення тиску на вході НПС. Її значення на 3-23 % менше за теоретично очікуване значення половини тиску, що створювали в момент відключення зупинені насоси.*

*Для нафтопроводу, на якому проводились експерименти, запропоновано аналітичні залежності для розрахунку коефіцієнта затухання хвилі підвищеного тиску як функцію кількості зупинених насосних агрегатів, витрати нафти та числа Рейнольдса в нафтопроводі до початку перехідного процесу.*

*Шляхом опрацювання даних промислових експериментів запропоновано розрахункові формули, які дають можливість достовірно прогнозувати динаміку підвищення тиску нафти у довільній точці нафтопроводу на першому та завершальному етапах перехідного процесу, спричиненого зупинкою на НПС одного чи двох насосних агрегатів.*

*За результатами промислових експериментів встановлено динаміку зміни у часі швидкості підвищення тиску на вході та виході НПС на різних етапах перехідного процесу за зупинки одного та двох насосних агрегатів. Встановлено, що швидкість зростання хвилі тиску на кожному етапі перехідного процесу можна достовірно описати експоненціальною функцією.*

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

*Путем обработки данных промышленных исследований, проведенных на отечественном магистральном нефтепроводе, установлены закономерности изменения давления при переходных процессах, вызванных изменением количества работающих насосных агрегатов.*

*Определена фактическая величина скачкообразного повышения давления на входе НПС. Ее значение на 3-23 % меньше теоретически ожидаемого значения половины давления, создаваемого остановленными насосами в момент их отключения.*

*Для нефтепровода, на котором проводились эксперименты, предложены аналитические зависимости для расчета коэффициента затухания волны повышенного давления как функцию количества остановленных насосных агрегатов, расхода нефти и числа Рейнольдса в нефтепроводе до начала переходного процесса.*

*Путем обработки данных промышленных исследований предложены расчетные формулы, позволяющие достоверно прогнозировать динамику повышения давления нефти в произвольной точке нефтепровода на первом и заключительном этапе переходного процесса, вызванного остановкой на НПС одного или двух насосных агрегатов.*

*По результатам промышленных экспериментов установлена динамика изменения во времени скорости повышения давления на входе и выходе НПС на разных этапах переходного процесса при остановке одного и двух насосных агрегатов. Установлено, что скорость роста волны давления на каждом этапе переходного процесса можно достоверно описать экспоненциальной функцией.*

*Ключевые слова: неустановившийся гідродинамічний процес, хвиля підвищеного тиску, швидкість зростання амплітуди хвилі підвищеного тиску, коефіцієнт затухання хвилі тиску, стрибкоподібне підвищення тиску.*

*The regularities of the pressure change during the transient phenomenon caused by the change in the number of running pumping units were defined with the help of the processed industrial experiments data conducted on the domestic trunk pipeline.*

*The actual magnitude of an abrupt pressure rise at the OPS inlet was found out. Its value is 3-23% below the half theoretically expected pressure value made by the pumps at the moment of their shutdown.*

*Analytical dependences for calculating the increased-pressure wave attenuation coefficient as a function of a number of shutdown pumping units, oil consumption, and Reynolds' number in the pipeline to the transient phenomenon beginning were developed for the pipeline where the experiments had been conducted.*

*Based on the processed industrial experiments data, calculation formula that enable to predict faithfully the oil pressure rise dynamics in any pipeline point both on the first and final stages of the transient phenomenon caused by shutdown of one or two OPS pumping units were developed.*

*The dynamics of pressure rise rate change at the OPS inlet and outlet on different stages of the transient phenomenon when one or two pumping units are shut down was determined according to the industrial experiments results. It was also found out that the pressure wave rise rate on each stage of the transient phenomenon can be faithfully described by the exponential function.*

Keywords: unstable hydrodynamic process, increased pressure wave, increased pressure wave rise rate, wave attenuation coefficient, abrupt pressure rise.

У процесі експлуатації магістральних нафтопроводів найбільш характерними прикладами перехідних процесів є гідродинамічні процеси, що виникають за зміни кількості працюючих насосних агрегатів, тобто у випадках зупинки або запуску окремих насосних агрегатів та нафтоперекачувальних станцій (НПС) загалом. Будь-яка зміна кількості або схеми працюючих на НПС насосів призводить до порушення усталеного режиму перекачування нафти, спричинює виникнення перехідного процесу, який характеризується швидкоплинними змінами тиску та продуктивності у кожному перерізі нафтопроводу.

Зазначені перехідні процеси нерідко призводять до порушення технологічних обмежень тиску у магістральному нафтопроводі, що може спричинити виникнення аварійних ситуацій. Ось чому прогнозування закономірностей гідродинамічних процесів, спричинених зміною кількості працюючих насосних агрегатів, має важливе теоретичне і практичне значення для забезпечення ефективної та надійної експлуатації магістральних нафтопроводів.

Теоретичним дослідженням закономірностей перехідних процесів у трубопроводах присвячені роботи М. В. Лур'є, А. В. Адоєвського, П. А. Мороза, Л. В. Полянської, Е. В. В'язнова, С. І. Перевошикова та ін. [1-7].

У роботі [8] нами досліджено закономірності зміни у часі обертової частоти, тиску та подачі нафтових насосів серії НМ у процесі їх зупинки. Виявлено характер зміни у часі тиску транспортованої нафти на вході і виході НПС за зупинки на ній одного або кількох послідовно працюючих насосних агрегатів. За результатами промислових експериментів побудовано графічні залежності величини стрибкоподібного підвищення тиску нафти від відстані до місця виникнення збурення. Оцінено інтенсивність затухання хвилі підвищеного тиску транспортованої нафти в нафтопроводі. За результатами експериментальних досліджень встановлено фактичну швидкість поширення хвилі підвищеного тиску нафти в трубопроводі. Її величина на 12 % перевищує значення, що розраховане за теоретичною формулою.

Встановлено, що залежність величини стрибкоподібного підвищення тиску від відстані до місця виникнення збурення можна достовірно описати експоненціальною залежністю. Виявлено чинники, від яких залежить значення коефіцієнта затухання хвилі тиску в нафтопроводі.

Однак у роботі [8] закономірності перехідних процесів в нафтопроводі описуються здебільшого в графічному вигляді, не пропонуються математичні моделі, які давали би можливість достовірно прогнозувати зміну тиску у довіль-

ному перерізі нафтопроводу залежно від його геометричних характеристик, режимних параметрів експлуатації та фізичних властивостей транспортованої рідини.

Робота, що наведена нижче, базується на даних промислових експериментів, проведених на діючому вітчизняному нафтопроводі, є узагальненням і подальшим розвитком наведених у роботі [8] досліджень закономірностей перехідних процесів, спричинених змінами кількості працюючих насосних агрегатів.

**Мета і задачі досліджень.** Метою роботи є опрацювання даних промислових експериментів та встановлення закономірностей зміни тиску в магістральному нафтопроводі за перехідних процесів, викликаних зміною кількості працюючих насосних агрегатів.

У процесі досліджень вирішувались такі задачі:

1) виявлення величини стрибкоподібної зміни тиску на вході і виході НПС за зупинки та запуску насосних агрегатів;

2) встановлення залежності коефіцієнта затухання хвилі тиску від режимних параметрів роботи нафтопроводу і кількості зупинених насосів;

3) прогнозування величини стрибкоподібного підвищення тиску на виході попередньої НПС у випадку зупинки насосів на наступній НПС;

4) виявлення закономірностей зміни тиску у довільному перерізі нафтопроводу на заключному етапі перехідного процесу;

5) встановлення динаміки зміни у часі швидкості підвищення тиску на вході та виході НПС на різних етапах перехідного процесу.

**Об'єкт дослідження** – вітчизняні магістральні нафтопроводи.

**Предмет дослідження** – перехідні гідродинамічні процеси, що виникають при зупинках і запусках насосних агрегатів.

**Методи дослідження** – математична обробка з використанням комп'ютерних технологій результатів промислових експериментів, виконаних на магістральному нафтопроводі.

Промислові експерименти гідродинаміки перехідних процесів виконано на вітчизняному нафтопроводі номінальним діаметром 700 мм і довжиною 400 км. На трасі нафтопроводу працюють чотири НПС, оснащені нафтовими насосами серії НМ. На трасі нафтопроводу передбачено 14 контрольних пунктів, оснащених сучасними засобами контролю режимних параметрів. Для вимірювання тиску транспортованої рідини використано давачі тиску типу Mikrotran F-R Fishers з класом точності 0,075-0,1.

Таблиця 1 – Порівняння дослідних і теоретично очікуваних значень стрибкоподібного підвищення тиску на вході НПС у разі зупинки насосів

№ режиму	Дата реалізації	Тиск, створений насосами, що зупиняються, бар	Підвищення тиску на вході НПС, бар		Значення емпіричного коефіцієнта $k_p$	Зміна схеми роботи насосів
			теоретичне значення	дослідне значення		
1	10.08.2012	18,8	9,4	8,9	0,948	Зупинка МА№2 НПС 4
2	08.07.2012	19,6	9,8	9,5	0,970	Зупинка МА№2 НПС 4
3	25.04.2012	19,6	9,8	9,4	0,959	Зупинка МА№1 НПС 4
4	23.04.2012	17,2	8,6	8,3	0,965	Зупинка МА№3 НПС 4
5	25.02.2012	24,0	12,0	10,2	0,849	Зупинка МА№1 НПС 3
6	21.08.2013	19,8	9,9	8,5	0,861	Зупинка МА№1 НПС 3
7	26.07.2013	20,0	10,0	8,4	0,843	Зупинка МА№1 НПС 2
		16,3	8,1	6,6	0,807	Зупинка МА№1 НПС 4
8	11.07.2013	19,8	9,9	8,4	0,851	Зупинка МА№1 НПС 2
		16,3	8,1	6,6	0,807	Зупинка МА№1 НПС 4
9	08.07.2013	20,0	10,0	8,0	0,804	Зупинка МА№1 НПС 2
		16,3	8,1	6,6	0,807	Зупинка МА№1 НПС 4
10	27.04.2013	19,4	9,7	8,7	0,899	Зупинка МА№2 НПС 3
11	06.04.2013	19,8	9,9	8,4	0,851	Зупинка МА№1 НПС 2
		16,9	8,4	8,1	0,965	Зупинка МА№2 НПС 4
12	04.04.2013	21,4	10,7	10,4	0,972	Зупинка МА№3 НПС 3
		17,7	8,8	8,5	0,967	Зупинка МА№1 НПС 4
13	16.03.2013	20,8	10,4	9,1	0,877	Зупинка МА№1 НПС 2
		17,1	8,5	8,4	0,989	Зупинка МА№2 НПС 4
14	09.02.2013	17,5	8,7	8,5	0,978	Зупинка МА№1 НПС 4
15	08.02.2013	23,2	11,6	11,5	0,992	Зупинка МА№4 НПС 3
		17,3	8,6	8,5	0,989	Зупинка МА№1 НПС 4
16	11.09.2013	20,0	10,0	8,7	0,873	Зупинка МА№1 НПС 2
		19,6	9,8	7,7	0,780	Зупинка МА№2 НПС 3
		16,3	8,1	6,6	0,807	Зупинка МА№1 НПС 4
17	25.02.2012	40,8	20,4	18,2	0,894	Зупинка МА№1,3 НПС2
18	18.01.2012	44,0	22,0	17,7	0,805	Зупинка МА№1,3 НПС3
19	18.07.2013	37,9	18,9	15,7	0,829	Зупинка МА№2,3 НПС 3
20	31.08.2013	38,8	19,4	15,4	0,793	Зупинка МА№2,3 НПС 3
21	13.03.2013	41,0	20,5	17,7	0,861	Зупинка МА№1,3 НПС 2
		39,4	19,7	18,4	0,935	Зупинка МА№1,3 НПС 3
		33,9	17,0	16,4	0,965	Зупинка МА№1,2 НПС 4
22	23.02.2013	41,2	20,6	17,7	0,857	Зупинка МА№1,3 НПС 2
		37,1	18,5	15,9	0,857	Зупинка МА№2,3 НПС 3
		35,1	17,6	17,1	0,972	Зупинка МА№1,2 НПС 4
23	03.04.2013	40,6	20,3	17,7	0,870	Зупинка МА№1,3 НПС 2
		18,6	9,3	8,4	0,905	Зупинка МА№2 НПС 3
		34,3	17,2	16,8	0,977	Зупинка МА№1,2 НПС 4

Як зазначалось у роботах [1-8], при зупинці одного чи кількох послідовно працюючих насосів на вході НПС спостерігається стрибкоподібне підвищення тиску, а на виході НПС – стрибкоподібне зниження тиску нафти. При запуску насосного агрегату, навпаки, має місце стрибкоподібне підвищення тиску на виході НПС і відповідне зменшення тиску на її вході. Максимально можливе значення зміни тиску на вході і виході НПС дорівнює половині величи-

ни тиску, який створювали відключені насоси у момент зупинки [8]. Виконання зазначеної умови на практиці перевірялось шляхом вимірювання та математичної обробки параметрів перехідних процесів під час експлуатації магістрального нафтопроводу протягом 2012-2013 рр. Фрагмент одержаних результатів щодо дослідних і теоретично очікуваних значень стрибкоподібного підвищення тиску на вході НПС у разі зупинки насосів наведено у таблиці 1.

Аналіз даних таблиці 1 засвідчує, що фактична величина стрибкоподібного підвищення тиску на вході НПС на 3-23 % менша за теоретично очікуване значення, а саме половину тиску, що створювали в момент відключення зупинені насоси. З урахуванням даних таблиці 1 можна записати такий вираз для величини стрибкоподібного підвищення тиску на вході НПС у разі зупинки насосів:

$$\Delta P_{ex} = 0,5k_p P_0, \quad (1)$$

де  $k_p$  – емпіричний коефіцієнт зменшення стрибкоподібного підвищення тиску на вході НПС при зупинці насосів, зумовлений наявністю гідравлічних опорів вхідних комунікацій станції;

$P_0$  – тиск, що створювали в момент відключення зупинені насоси.

Конкретне значення коефіцієнта  $k_p$  залежить від десятків чинників, а саме від особливостей трубопроводної об'язки НПС, технічних характеристик зворотних клапанів, типу і кількості насосів, що зупиняються, режимних параметрів перекачування нафти тощо. Відповідно до даних таблиці 1 для умов експлуатації нафтопроводу за 2012-2013 рр. дослідні значення цього коефіцієнта знаходились у діапазоні 0,77-0,97.

Для прогнозованих розрахунків параметрів перехідних процесів в нафтопроводі, на якому виконувались промислові експерименти, доцільно приймати максимальне значення коефіцієнта  $k_p = 0,97$ .

Таким чином, за результатами промислових експериментів на діючому нафтопроводі нами встановлена величина стрибкоподібного підвищення тиску транспортованої нафти на вході НПС.

Наступним етапом досліджень було виявлення закономірностей поширення хвиль підвищеного тиску в лінійній частині нафтопроводу після зупинки одного чи кількох насосних агрегатів.

Відповідно до результатів теоретичних досліджень [1-3], 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 потоку нафти) і далі до початку експлуатаційної ділянки нафтопроводу.

Як зазначалось у роботі [8], залежність величини стрибкоподібного підвищення тиску у довільному перерізі нафтопроводу від відстані до місця відключення насоса можна описати експоненціальною функцією:

$$\Delta P = \Delta P_{ex} \exp(-K_3 x), \quad (2)$$

де  $\Delta P_{ex}$  – значення стрибкоподібного підвищення тиску на вході НПС, де відбулась зупинка насосних агрегатів;

$K_3$  – коефіцієнт затухання хвилі тиску;

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

Нами проаналізовано та опрацьовано результати промислових експериментів для кількох десятків режимів експлуатації нафтопроводу, пов'язаних із зупинкою і запуском насосних агрегатів на проміжних НПС. Шляхом математичного моделювання з використанням комп'ютерних технологій одержані експоненціальні моделі залежності величини стрибкоподібного підвищення тиску за перехідного процесу від відстані до місця виникнення збурення – зупинки або запуску одного чи двох насосних агрегатів. Таблиця 2 містить фрагмент даних щодо фактичної величини початкового підвищення тиску на вході НПС і дослідних значень коефіцієнта затухання хвилі підвищення тиску.

Для практики експлуатації магістрального нафтопроводу важливим є адекватне прогнозування величини стрибкоподібного підвищення тиску на виході попередньої НПС у випадку зупинки насосів на наступній НПС.

Із таблиці 2 бачимо, що за результатами промислових експериментів у випадку зупинки одного насосного агрегату амплітуда стрибкоподібного підвищення тиску на виході попередньої НПС для всіх режимів експлуатації не перевищувала 3,6 бар. У випадку зупинки двох послідовно працюючих насосних агрегатів амплітуда стрибкоподібного підвищення тиску на виході попередньої НПС для розглянутих режимів експлуатації не перевищувала 5,4 бар.

Експерименти засвідчили, що якщо хвиля підвищеного тиску проходила два перегони між НПС, то амплітуда стрибкоподібного підвищення тиску на виході попередньої НПС становила максимально 1,5 бар для випадку зупинки одного насоса і 2,5 бар у разі одночасної зупинки двох послідовно працюючих насосів.

За результатами експериментальних досліджень для конкретної нафтопроводної системи, на якій проводили промислові експерименти, розроблені регресійні моделі для коефіцієнта затухання хвилі підвищеного тиску.

За відомої швидкості поширення хвилі  $c = 1110$  м/с і внутрішнього діаметра трубопроводу  $D = 0,702$  м коефіцієнт затухання хвилі підвищеного тиску в нафтопроводі представляли степеневою функцією годинної витрати нафти до зупинки  $Q_{zod}$  і числа Рейнольдса  $Re$

$$K_3 = a Q_{zod}^b Re^c, \quad (3)$$

де  $a, b, c$  – коефіцієнти моделі, які залежить від режиму роботи нафтопроводу до зупинки та кількості відключених насосів.

Коефіцієнти регресії визначались методом найменших квадратів. У результаті одержано такі регресійні моделі:

- у разі зупинки на НПС одного насосного агрегату:

$$K_3 = 2,84 \cdot 10^{-4} \frac{Q_{zod}^{0,728}}{Re^{0,153}}, \quad (4)$$

- у разі зупинки на НПС двох послідовно працюючих насосних агрегатів:

$$K_3 = 1,20 \cdot 10^{-4} \frac{Q_{zod}^{0,866}}{Re^{0,184}}. \quad (5)$$

Таблиця 2 – Дослідні значення коефіцієнта затування хвилі підвищення тиску при зупинках насосних агрегатів

№ режиму	Дата реалізації	Дослідне значення підвищення тиску на вході НПС, бар	Дослідне значення коефіцієнта затування хвилі тиску, км <sup>-1</sup>	Величина підвищення тиску на виході попередньої НПС, бар		Зміна схеми роботи насосів
				дослідне	розраховане за моделлю	
1	10.08.2012	8,9	0,0136	2,3	2,4	Зупинка МА№2 НПС 4
2	08.07.2012	9,5	0,0126	2,8	2,8	Зупинка МА№2 НПС 4
3	25.04.2012	9,4	0,0125	2,6	2,8	Зупинка МА№1 НПС 4
4	23.04.2012	8,3	0,0141	2,1	2,1	Зупинка МА№3 НПС 4
5	25.02.2012	10,2	0,0145	2,6	2,5	Зупинка МА№1 НПС 3
6	21.08.2013	8,5	0,0148	2,0	2,0	Зупинка МА№1 НПС 3
7	26.07.2013	8,4	0,0153	1,8	1,7	Зупинка МА№1 НПС 2
8	11.07.2013	8,4	0,0156	1,8	1,7	Зупинка МА№1 НПС 2
9	08.07.2013	8,0	0,0156	1,8	1,6	Зупинка МА№1 НПС 2
10	27.04.2013	8,7	0,0140	2,1	2,3	Зупинка МА№2 НПС 3
11	06.04.2013	8,4	0,0156	1,6	1,7	Зупинка МА№1 НПС 2
12	04.04.2013	10,4	0,0132	2,7	2,9	Зупинка МА№3 НПС 3
		8,5		2,1	2,4	Зупинка МА№1 НПС 4
13	16.03.2013	9,1	0,0155	1,5	1,8	Зупинка МА№1 НПС 2
		8,4		1,8	1,9	Зупинка МА№2 НПС 4
14	09.02.2013	8,5	0,0132	2,4	2,4	Зупинка МА№1 НПС 4
15	08.02.2013	11,5	0,0133	3,3	3,2	Зупинка МА№4 НПС 3
16	11.09.2013	6,6	0,0142	1,5	1,7	Зупинка МА№1 НПС 4
17	25.02.2012	18,2	0,0138	4,3	4,4	Зупинка МА№1,3 НПС 2
18	18.01.2012	17,7	0,0124	5,4	5,4	Зупинка МА№1,3 НПС 3
19	18.07.2013	15,7	0,0118	4,7	4,7	Зупинка МА№2,3 НПС 3
20	31.08.2013	15,4	0,0123	4,6	4,7	Зупинка МА№2,3 НПС 3
21	13.03.2013	17,7	0,0142	4,1	4,1	Зупинка МА№1,3 НПС 2
		18,4		4,5	4,7	Зупинка МА№1,3 НПС 3
		16,4		4,1	4,2	Зупинка МА№1,2 НПС 4
22	23.02.2013	17,7	0,0142	4,1	4,1	Зупинка МА№1,3 НПС 2
		15,9		4,1	4,1	Зупинка МА№2,3 НПС 3
		17,1		4,3	4,3	Зупинка МА№1,2 НПС 4
23	03.04.2013	17,7	0,0142	3,7	4,1	Зупинка МА№1,3 НПС 2
		16,8		4,3	4,3	Зупинка МА№1,2 НПС 4

Таблиця 3 містить результати порівняння значень коефіцієнта затування хвилі тиску, розрахованих за регресійними моделями, з даними промислових експериментів.

З таблиці 3 видно, що результати розрахунку коефіцієнта затування хвилі підвищеного тиску в нафтопроводі за регресійними моделями добре корелюються з результатами опрацювання промислових експериментів. Максимальне відхилення результатів становить  $\pm 6\%$ . Ці залежності можна застосовувати для розрахунку стрибкоподібних змін тиску при перехідних процесах, спричинених зупинкою чи запуском насосних агрегатів на НПС нафтопроводу, що досліджувався.

У будь-якому перерізі нафтопроводу, який розміщений до місця зупинки насосів, перехідний процес не завершується практично миттє-

вим підвищенням тиску. Після стрибкоподібного підвищення тиску, що триває секунди, протягом 20-30 хв відбувається значно повільніше зростання тиску нафти до значення  $P_{унз}$ , що має місце за нового усталеного режиму експлуатації нафтопроводу. Цьому режиму відповідає нова схема роботи насосів на НПС та нове значення робочої витрати транспортованої нафти.

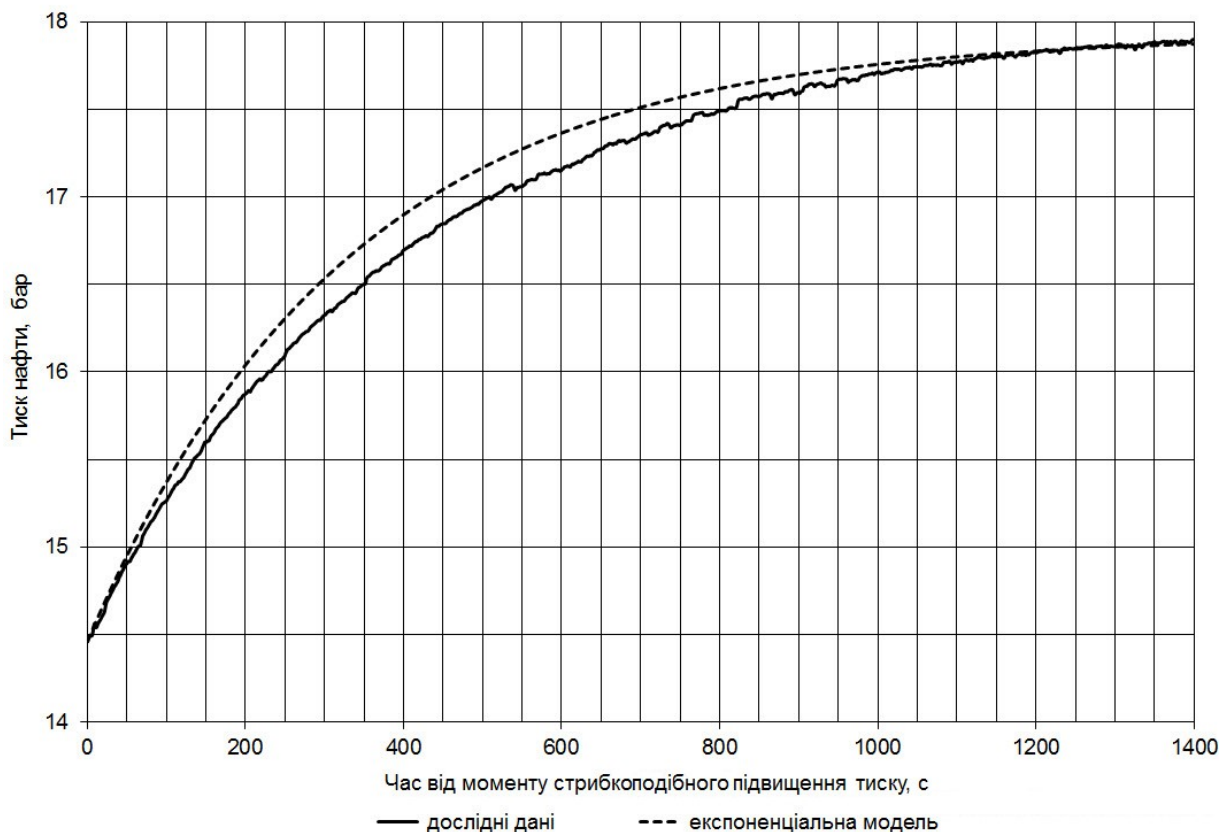
Режимні параметри роботи нафтопроводу після завершення перехідного процесу залежать від схем роботи насосів на НПС до і після зупинки, від схеми роботи лінійної частини, від технологічних обмежень щодо тиску, від сезонних умов перекачування тощо. Для конкретної зупинки насоса на певній НПС зазначені параметри можуть бути знайдені шляхом аналізу дослідних даних вимірювання тиску і витрати нафти. Для прогнозування режимних па-

Таблиця 3 – Порівняння значень коефіцієнта затухання хвилі тиску, розрахованих за регресійними моделями, з даними промислових експериментів

№ досліджу	Дата реалізації	Годинна витрата нафти, м <sup>3</sup> /год	Число Рейнольдса	Дослідне значення, км <sup>-1</sup>	Значення, розраховане за регресійною моделлю, км <sup>-1</sup>	Відносна похибка, %
Зупинка одного насосного агрегату						
1	10.08.12	2132	66338	0,01360	0,01381	1,5
2	08.07.12	1800	56708	0,01260	0,01250	-0,8
3	25.04.12	1689	39054	0,01250	0,01264	1,1
4	23.04.12	2096	46957	0,01410	0,01438	2,0
5	25.02.12	2042	38123	0,01450	0,01456	0,4
6	24.08.13	2437	73470	0,01480	0,01498	1,2
7	18.09.13	2430	68544	0,01460	0,01511	3,5
8	26.04.13	2370	51119	0,01477	0,01552	5,1
9	15.02.13	1634	27129	0,01335	0,01304	-2,3
10	09.08.13	2472	77540	0,01490	0,01502	0,8
11	26.08.13	2145	64397	0,01407	0,01393	-1,0
12	23.08.13	2435	72843	0,01470	0,01499	2,0
13	20.06.13	2448	75104	0,01470	0,01498	1,9
14	07.06.13	2454	71876	0,01490	0,01511	1,4
15	26.07.13	2455	77977	0,01530	0,01493	-2,4
16	11.07.13	2459	81279	0,01560	0,01485	-4,8
17	08.07.13	2459	82744	0,01563	0,01481	-5,2
18	27.04.13	2073	45571	0,01400	0,01433	2,3
19	06.04.13	2327	39295	0,01560	0,01594	2,2
20	04.04.13	1598	26743	0,01318	0,01286	-2,4
21	16.03.13	2310	39035	0,01550	0,01587	2,4
22	09.02.13	1654	36392	0,01320	0,01258	-4,7
23	08.02.13	1651	28550	0,01328	0,01304	-1,8
24	11.09.13	2460	71926	0,01420	0,01514	6,6
25	29.08.13	1710	50056	0,01300	0,01228	-5,6
26	19.08.13	2125	63382	0,01330	0,01387	4,3
27	13.09.13	1255	34232	0,00990	0,01039	4,9
28	23.05.13	1170	30765	0,00950	0,01003	5,6
29	18.06.13	2150	63976	0,01480	0,01397	-5,6
30	11.07.13	2175	71892	0,01450	0,01384	-4,6
31	18.03.13	1969	33463	0,01470	0,01447	-1,6
32	09.03.13	1982	32249	0,01530	0,01462	-4,5
Зупинка двох насосних агрегатів						
33	25.02.12	2330	43499	0,01380	0,01396	1,2
34	18.01.12	2083	45063	0,01240	0,01259	1,5
35	18.07.13	2161	71996	0,01180	0,01192	1,1
36	31.08.13	2110	61302	0,01230	0,01203	-2,2
37	13.03.13	2300	38931	0,01420	0,01409	-0,8
38	23.02.13	2329	38925	0,01420	0,01424	0,3
39	03.04.13	2289	38563	0,01420	0,01406	-1,0

раметрів експлуатації нафтопроводу за довільної схеми роботи насосів до і після зупинки необхідно використовувати програмне забезпечення для визначення пропускної здатності і режимних параметрів роботи нафтопроводу.

Шляхом опрацювання даних промислових експериментів нами одержана така закономірність підвищення тиску від часу (с) у довільному перерізі нафтопроводу на заключному етапі перехідного процесу, спричиненому зупинкою насоса (див. таблицю 4):



**Рисунок 1 – Динаміка зміни тиску у часі на заключному етапі перехідного процесу, спричиненого зупинкою насоса на НПС 4 (вхід НПС 4)**

$P(x, t) = P_{nc} + (P_{ynz} - P_{nc})[1 - \exp(-\mu t)]$ , (6)  
 де  $P_{nc}$  - тиск рідини у довільному перерізі нафтопроводу після стрибкоподібного підвищення, визначеного за формулою (2):

$$P_{nc} = P_y + \Delta P, \quad (7)$$

$P_{ynz}$  - тиск нафти у довільному перерізі нафтопроводу за нового усталеного режиму експлуатації;

$\mu$  - коефіцієнт математичної моделі,  $s^{-1}$

$$\mu = -\frac{1}{1200} \ln \left( 1 - \frac{0,995 P_{ynz} - P_{nc}}{P_{ynz} - P_{nc}} \right). \quad (8)$$

На рисунках 1-3 зображено фактична та розрахована за формулами (6)–(8) динаміка зміни тиску на заключному етапі перехідного процесу, спричиненому зупинкою насоса на НПС 4, (дослід 22, таблиця 3) для таких точок нафтопроводу: на вході НПС 4 (рисунок 1), на відстані 9 км від НПС 4 (рисунок 2), на відстані 25 км від НПС 4 (рисунок 3).

Аналіз графіків, зображених на рисунках 1-3 засвідчує, що формули (6)–(9) дають можливість достовірно прогнозувати динаміку підвищення тиску нафти на заключному етапі перехідного процесу, спричиненого зупинкою на НПС одного чи кількох насосних агрегатів.

Як зазначалось у роботах [5, 8], перший стрибкоподібний і другий заключний, більш повільний, етапи зміни тиску у будь-якому пе-

рерізі трубопроводу за перехідного процесу суттєво відрізняються за швидкістю зміни тиску нафти.

За результатами промислових експериментів визначено динаміку зміни у часі швидкості підвищення тиску на вході НПС при зупинці одного і двох насосних агрегатів. На рисунку 4 зображено динаміку зміни у часі швидкості підвищення тиску на вході НПС при зупинці одного насоса на першому етапі перехідного процесу – під час стрибкоподібного зростання тиску.

Із рисунка 4 бачимо, що максимальне значення швидкості зміни тиску 3,4 бар/с відповідає початку перехідного процесу. Протягом 10 с швидкість підвищення тиску на вході НПС зменшується за експоненціальним законом від значення 3,4 до 0,1 бар/с. Закономірність зміни швидкості підвищення тиску на вході НПС (бар/с) від часу від початку перехідного процесу (с) може бути достовірно описана такою залежністю:

$$y = 3,4 \exp(-0,407t). \quad (9)$$

На рисунку 5 зображена динаміка зміни у часі швидкості підвищення тиску на вході НПС при зупинці одного насоса на заключному етапі перехідного процесу – під час повільного зростання тиску.

Із рисунка 5 можна зробити висновок, що максимальне значення швидкості зміни тиску 0,018 бар/с відповідає початку заключного етапу

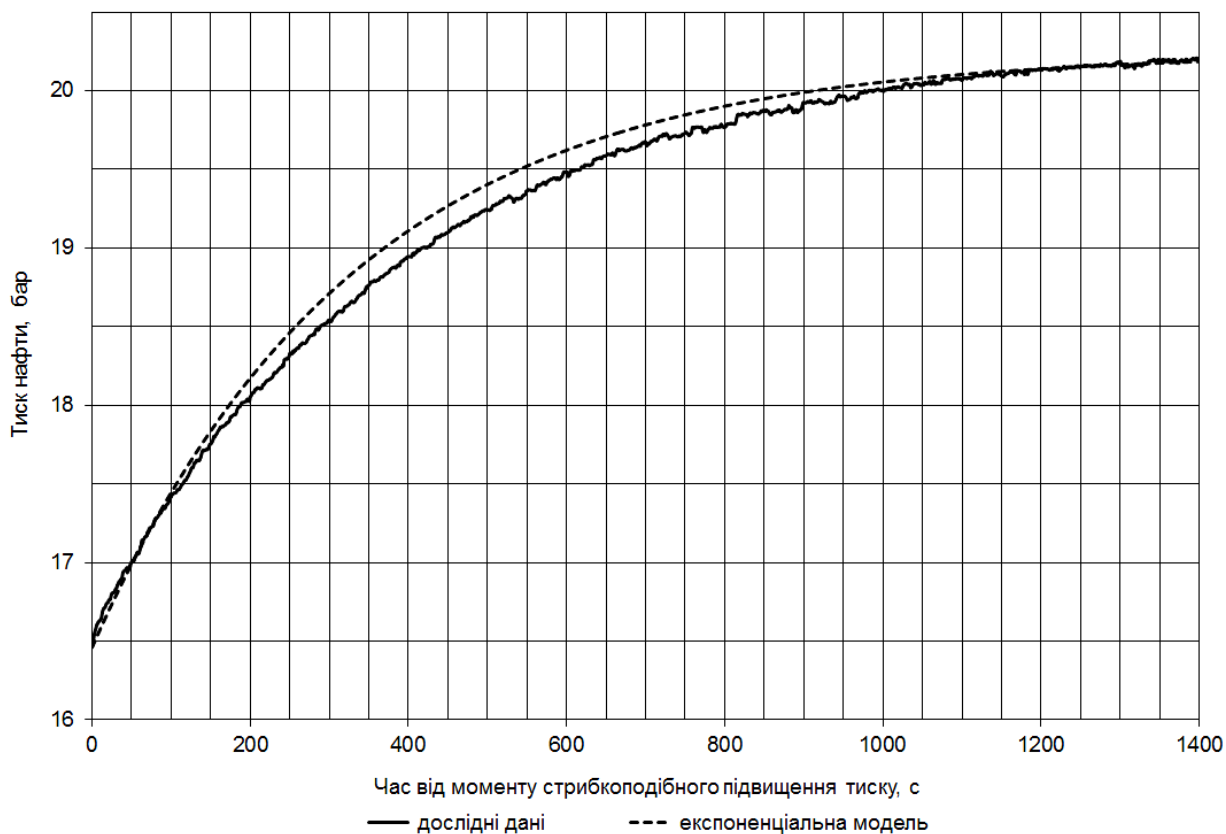


Рисунок 2 – Динаміка зміни тиску у часі на заключному етапі перехідного процесу, спричиненого зупинкою насоса на НПС 4 (на відстані 9 км від НПС 4)

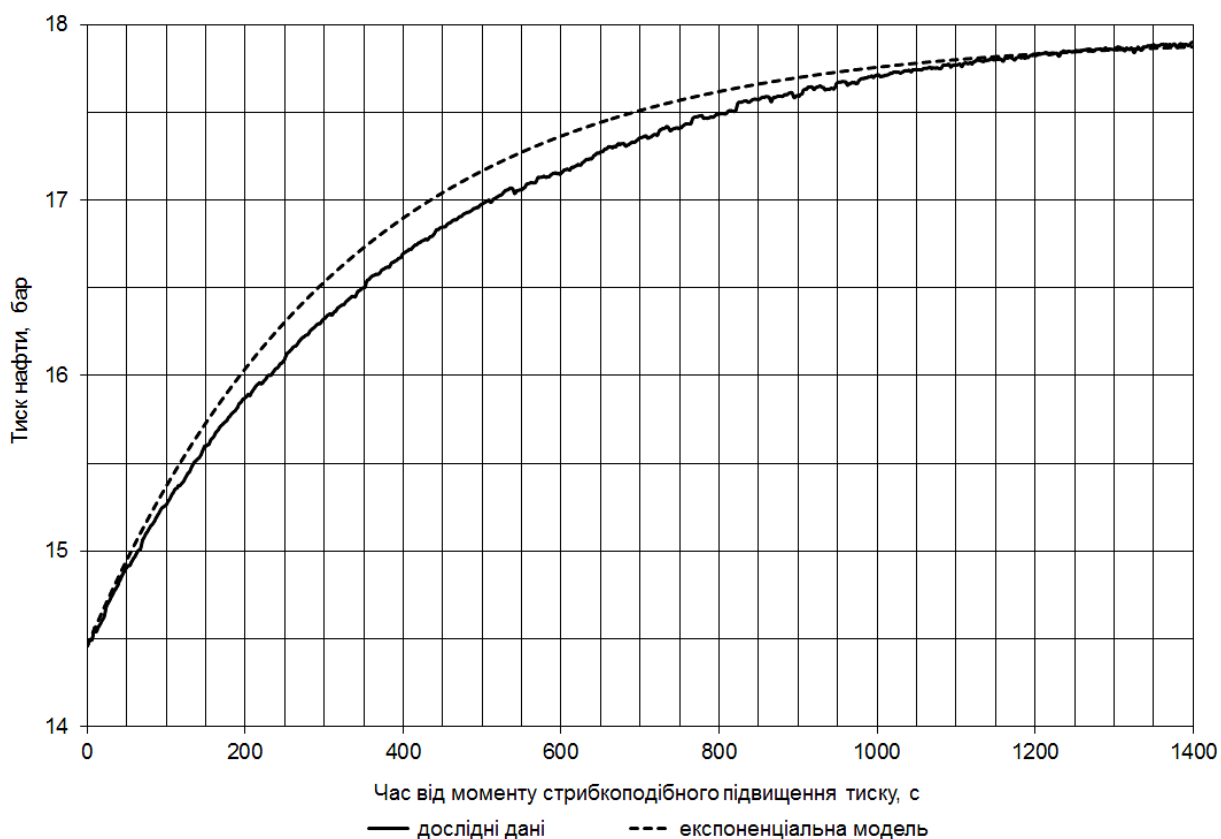
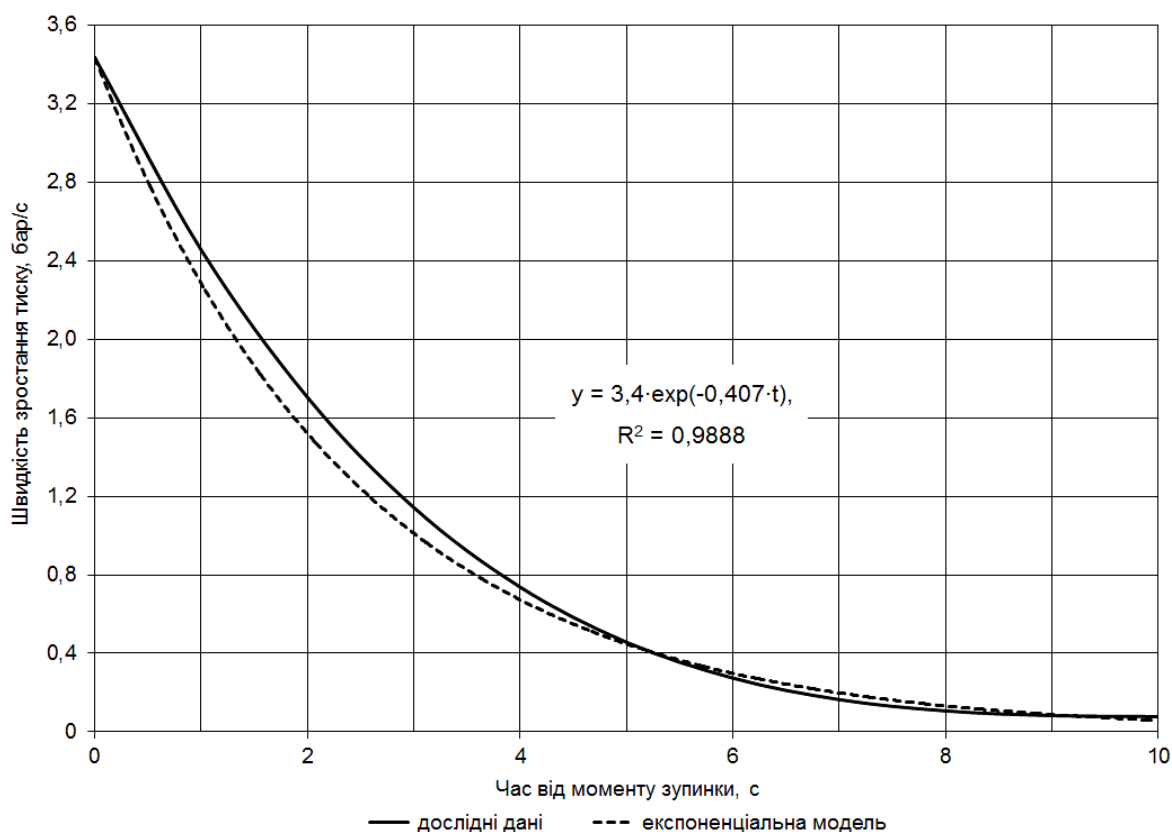


Рисунок 3 – Динаміка зміни тиску у часі на заключному етапі перехідного процесу, спричиненого зупинкою насоса на НПС 4 (на відстані 25 км від НПС 4)





**Рисунок 4 – Динаміка зміни швидкості підвищення тиску на вході НПС 4 після зупинки МА№1 під час стрибкоподібного підвищення тиску (перший етап перехідного процесу)**

**Таблиця 4 – Характерні значення тиску для перехідного процесу, спричиненого зупинкою одного насосного агрегату на вході НПС, де зупинили насосний агрегат та на виході попередньої НПС**

№ ре-жи-му	Дата реалізації	Значення параметрів на НПС, де відбулась зупинка, бар				Значення параметрів на попередній НПС, бар				Зміна схеми роботи насосів
		тиск на вході НПС до зупинки	величина стрибкоподібного - підвищення тиску	тиск на вході НПС після підвищення тиску	тиск на вході НПС для нового усталеного режиму	тиск на вході НПС до зупинки	величина стрибкоподібного - підвищення тиску	тиск на вході НПС після підвищення тиску	тиск на вході НПС для нового усталеного режиму	
1	25.04.2012	3,5	9,4	12,9	17,6	11,1	2,6	13,7	19,2	Зупинка МА№1 НПС 4
2	15.02.2013	5,0	8,3	13,3	18,0	27,1	2,3	29,4	36,5	Зупинка МА№1 НПС 4
3	04.04.2013	5,9	10,4	16,3	21,7	30,2	2,7	32,9	37,2	Зупинка МА№3 НПС 3
4	09.02.2013	5,2	8,5	13,7	18,0	28,2	2,4	30,6	37,0	Зупинка МА№1 НПС 4
5	08.02.2013	4,9	11,5	16,4	22,1	27,5	3,3	30,8	35,2	Зупинка МА№4 НПС 3

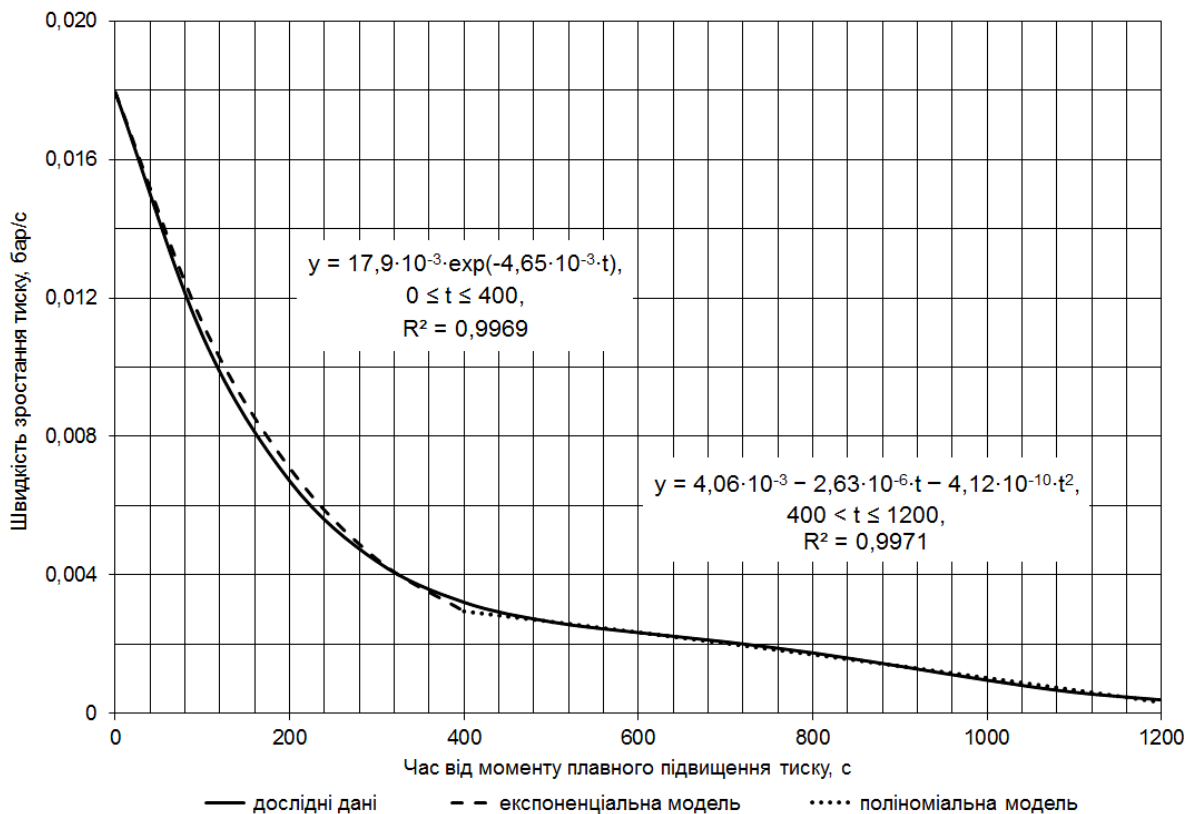


Рисунок 5 – Динаміка зміни швидкості підвищення тиску на вході НПС 4 після зупинки МА№1 під час повільного підвищення тиску (заключний етап перехідного процесу)

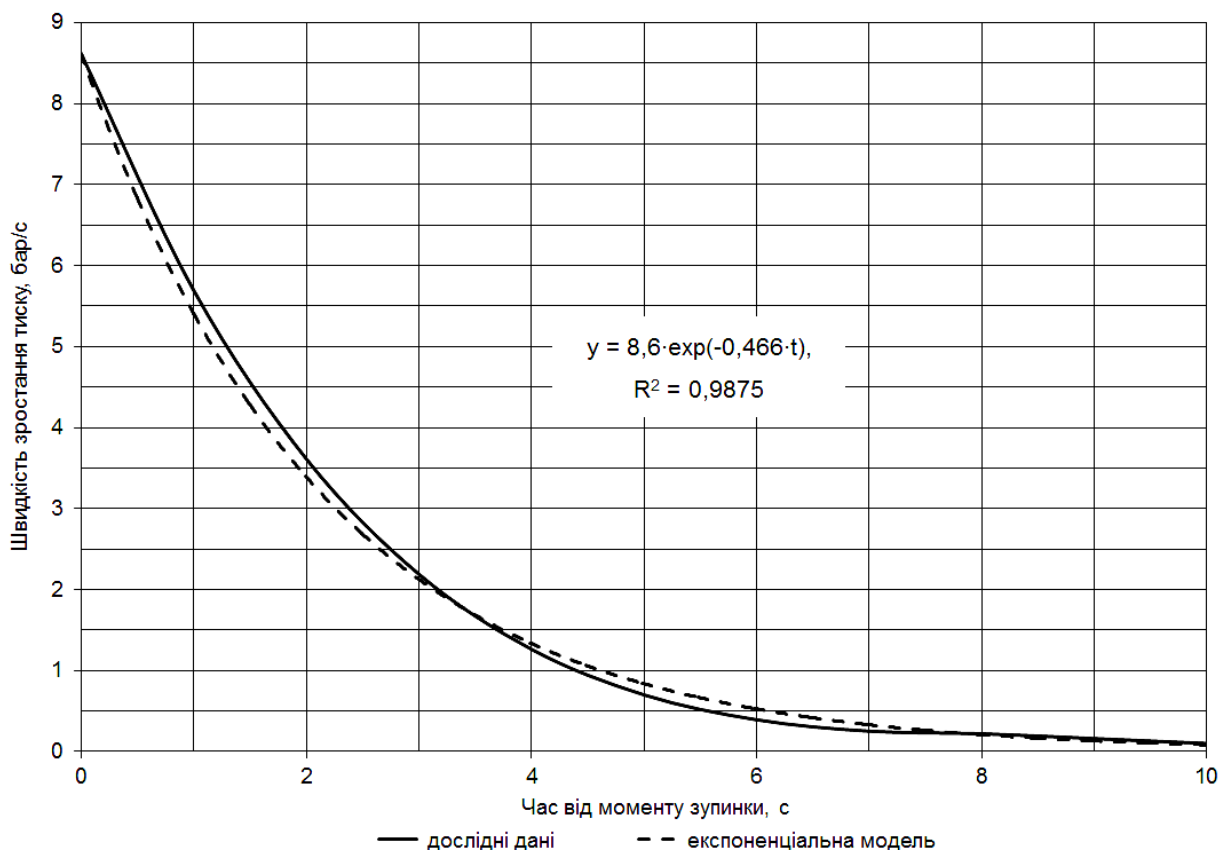


Рисунок 6 – Динаміка зміни швидкості підвищення тиску на вході НПС 2 після зупинки МА№1,3 під час стрибкоподібного підвищення тиску (перший етап перехідного процесу)

перехідного процесу. Протягом 20 хв швидкість підвищення тиску на вході НПС зменшується від значення 0,018 бар/с практично до нуля, що відповідає стабілізації тиску і встановленню нового усталеного режиму роботи нафтопроводу. Закономірність зміни швидкості підвищення тиску на вході НПС (бар/с) від часу від початку другого етапу перехідного процесу (с) може бути достовірно описана такими залежностями:

- у діапазоні часу від 0 до 600 с:

$$y = 17,9 \cdot 10^{-3} \exp(-4,65 \cdot 10^{-3} t); \quad (10)$$

- у діапазоні часу від 600 до 1200 с:

$$y = 4,06 \cdot 10^{-3} - 2,63 \cdot 10^{-6} t - 4,12 \cdot 10^{-10} t^2. \quad (11)$$

Максимальне значення швидкості підвищення тиску під час першого етапу перехідного процесу майже у 200 разів перевищує аналогічне значення для заключного етапу перехідного процесу.

Очевидно, що швидкість зміни тиску на вході НПС буде залежати від кількості одночасно зупинених чи запущених в експлуатацію насосів. Рисунок 6 ілюструє одержану за результатами промислового експерименту динаміку зміни у часі швидкості підвищення тиску на вході НПС за зупинки двох послідовно працюючих насосів на першому етапі перехідного процесу – під час стрибкоподібного зростання тиску.

Із рисунка 6 видно, що максимальне значення швидкості зміни тиску 8,6 бар/с відповідає початку перехідного процесу. Протягом 10 с швидкість підвищення тиску на вході НПС зменшується за експоненціальним законом від значення 8,6 до 0,1 бар/с. Закономірність зміни швидкості підвищення тиску на вході НПС (бар/с) в часі від початку перехідного процесу (с) може бути достовірно описана експоненціальною залежністю:

$$y = 8,6 \exp(-0,466t). \quad (12)$$

Як свідчать експерименти, за одночасної зупинки на НПС двох послідовно працюючих насосів максимальне значення швидкості підвищення тиску під час першого етапу перехідного процесу в 430 разів перевищує аналогічне значення для заключного етапу.

Опрацювання результатів експериментальних досліджень перехідних процесів, спричинених зупинками насосних агрегатів, на діючому магістральному нафтопроводі, дали змогу зробити такі висновки:

1. При відключенні насоса (НПС) спостерігається швидке підвищення тиску на її вході і відповідне зменшення тиску на її виході. Фактична величина стрибкоподібного підвищення тиску на вході НПС на 3-23 % менша за теоретично очікуване значення, а саме половину тиску, що створювали в момент відключення зупинені насоси.

2. Для нафтопроводу, на якому проведені експерименти, за відомих значень діаметра і швидкості звуку, коефіцієнт затухання хвилі тиску можна представити степеневою функцією витрати нафти і характеристики режиму пе-

рекачування – числа Рейнольдса. Коефіцієнти регресійних моделей, значення яких залежать від кількості зупинених насосів, визначені за даними промислових експериментів методом найменших квадратів.

3. Результати розрахунку коефіцієнта затухання хвилі підвищеного тиску в нафтопроводі за регресійними моделями добре корелюються з результатами опрацювання промислових експериментів. Максимальне відхилення результатів становить  $\pm 6\%$ . Ці залежності можна застосовувати для розрахунку стрибкоподібних змін тиску при перехідних процесах, спричинених зупинкою чи запуском насосних агрегатів на НПС нафтопроводу, що досліджувався.

4. Після стрибкоподібного підвищення тиску, що триває секунди, протягом 20-30 хв відбувається значно повільніше зростання тиску нафти до значення, що відповідає новому усталеному режиму експлуатації нафтопроводу. Цьому режиму відповідає нова схема роботи насосів на НПС та нове значення робочої витрати транспортованої нафти.

5. Шляхом опрацювання даних промислових експериментів запропоновано аналітичні формули, які дають можливість достовірно прогнозувати динаміку підвищення тиску нафти у довільній точці нафтопроводу на заключному етапі перехідного процесу, спричиненого зупинкою на НПС одного чи двох насосних агрегатів.

6. За результатами промислових експериментів визначено динаміку зміни у часі швидкості підвищення тиску на вході НПС при зупинці одного та двох насосних агрегатів. За зупинки одного насоса максимальне значення швидкості зміни тиску 3,4 бар/с відповідає початку перехідного процесу. Протягом 10 с швидкість підвищення тиску на вході НПС зменшується за експоненціальним законом від значення 3,4 до 0,1 бар/с. За зупинки двох насосів максимальне значення швидкості зміни тиску становить 8,6 бар/с. Протягом 10 с швидкість підвищення тиску на вході НПС зменшується за експоненціальним законом від значення 8,6 до 0,1 бар/с.

7. За одночасної зупинки на НПС двох послідовно працюючих насосів максимальне значення швидкості підвищення тиску під час першого етапу перехідного процесу в 430 разів перевищує аналогічне значення для заключного етапу. Звідси слідує, що небезпеку для експлуатації магістрального нафтопроводу представляє виключно перший етап перехідного процесу – стрибкоподібне підвищення тиску, спричинене зупинкою чи запуском насосних агрегатів на НПС.

Наступним етапом буде дослідження впливу зупинок насосних агрегатів на режим роботи магістрального нафтопроводу та дослідження динаміки зміни швидкості зростання хвилі підвищеного тиску на виході попередньої НПС у випадку зупинки насосів на наступній НПС.

*Література*

- 1 Лурье М. В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа / М. В. Лурье. – М.: Нефть и газ, 2003. – 335 с.
- 2 Адоевский А. В. Моделирование работы нефтепроводов, оборудованных системами сглаживания волн давления: дисс. канд. техн. наук.: 25.00.19 / Александр Валентинович Адоевский. – М., 2011. – 170 с.
- 3 Мороз П. А. Нестационарные процессы в магистральном нефтепроводе при изменении режима работы насосных станций / П.А. Мороз, Л. . Полянская // Нефтяное хозяйство. – 1965. – №5. – С. 63-68.
- 4 Трубопроводный транспорт нефти: [учеб. для вузов: В 2 т.] / [Г. Г. Васильев, Г. Е. Коробков, А. А. Коршак и др.]; под ред. С. М. Вайнштока. – М.: ООО “Недра-Бизнесцентр”, 2002. – Т. 1. – 407 с.
- 5 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. – 1966. – №1. – С. 12-15.
- 6 Вязунов Е. В. Расчет быстропротекающих переходных процессов, возникающих после включения и отключения насосных агрегатов / Е. В. Вязунов // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – 1974. – № 11. – С. 26-29.
- 7 Перевощиков С. И. Определение изменения давления в нефтепроводах при неустановившемся течении жидкости / С. И. Перевощиков // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – 1981. – № 2. – С. 6-9.
- 8 Середюк М.Д. Експериментальні дослідження перехідних процесів у магистральних 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.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
23.01.13*

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