

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗУПИНОК НАСОСНИХ АГРЕГАТИВ НА РЕЖИМ РОБОТИ МАГІСТРАЛЬНОГО НАФТОПРОВОДУ

С.Я. Григорський, М.Д. Середюк

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727139,  
e-mail: tzn@iung.edu.ua

*В результаті теоретичних досліджень встановлено закономірності зміни тиску у магістральному нафтопроводі за перехідних процесів, спричинених зупинками насосних агрегатів. Виконано математичне моделювання неусталених гідродинамічних процесів за допомогою комп'ютерних технологій з використанням програмного комплексу OLGA7.*

*Запропоновано аналітичні залежності для коефіцієнта затухання хвилі тиску в нафтопроводі для випадків зупинки одного, двох і трьох послідовно працюючих на НПС насосів як функцію витрати нафти, режиму руху та кінематичної в'язкості нафти для широкого діапазону їх зміни.*

*Розраховано теоретичну величину стрибкоподібного підвищення тиску на виході попередньої НПС у випадку зупинки насосів на наступній (за рухом нафти) НПС нафтопроводу.*

*Проведено апробацію отриманих аналітичних залежностей шляхом розрахунку перехідного процесу, спричиненого зупинкою насосного агрегату на одній із проміжних НПС вітчизняного магістрального нафтопроводу.*

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

*В результате теоретических исследований установлены закономерности изменения давления в магистральном нефтепроводе при переходных процессах, вызванных остановками насосных агрегатов. Выполнено математическое моделирование неустановившихся гидродинамических процессов с помощью компьютерных технологий с использованием программного комплекса OLGA7.*

*Предложены аналитические зависимости для коэффициента затухания волны давления в нефтепроводе для случаев остановки одного, двух и трех последовательно работающих на НПС насосов как функция расхода нефти, режима движения и кинематической вязкости нефти в широком диапазоне их изменения.*

*Рассчитана теоретическая величина скачкообразного повышения давления на выходе предыдущей НПС в случае остановки насосов на следующей (по направлению движения нефти) НПС нефтепровода.*

*Проведена апробация полученных аналитических зависимостей путем расчета переходного процесса, вызванного остановкой насосного агрегата на одной из промежуточных НПС отечественного магистрального нефтепровода.*

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

*As a result of theoretical studies there were determined the regularities of pressure change in oil-trunk pipeline during transitional processes caused by the stops of pumping units. There was performed a mathematical modeling of unsteady hydrodynamic processes by means of the computer technology applying software complex OLGA7.*

*There were shown analytical dependences for the attenuation coefficient of the pressure wave in the oil pipeline when one, two and three consecutively operating pumping units stop as a function of oil flow, flow mode and kinematic viscosity of oil for a wide range of changes.*

*There was calculated the theoretical value of an abrupt increase in pressure at the outlet of the previous OPS in case of the pump stop at the next (in the direction of oil flow) OPS of the oil pipeline.*

*The analytical dependences were tested by calculating the transitional process caused by the pump unit stop at one of the intermediate OPS of the domestic oil-trunk pipeline.*

*Keywords: unstable hydrodynamic process, of high pressure wave, propagation velocity of pressure wave, pressure wave attenuation, abrupt increase of pressure.*

Процес експлуатації магістральних нафтопроводів супроводжується запусками і зупинками насосних агрегатів і нафтоперекачувальних станцій (НПС). Окрім планових зупинок окремих насосів і НПС, зумовлених необхідністю зміни режиму транспортування нафти нафтопроводом, можуть відбуватися нештатні зупинки, зумовлені порушенням електропостачання або спрацьовуванням систем технологічного захисту трубопроводу.

За зупинки одного, кількох насосних агрегатів чи НПС в цілому на її виході виникає хвиля підвищеного тиску, а на виході – хвиля пониженого тиску. Амплітуда хвиль підвищеного і

пониженого тиску може становити 10-30 бар залежно від параметрів трубопроводу, кількості зупинених насосів, їх характеристик і режиму перекачування [1-7].

Хвиля підвищення тиску, що утворилася при зупинці насосів або НПС в цілому, рухається у напрямі попередньої (за рухом потоку нафти) НПС. Під час поширення в нафтопроводі з пересіченим профілем траси тиск в окремих перерізах може перевищити максимально допустимий, що може спричинити аварійну ситуацію. Із прибуттям хвилі підвищеного тиску на попередню НПС тиск на її виході стрибкоподібно зростає. Система автоматичного регулю-

вання тиску (САР), що встановлена на лінії нагнітання НПС, внаслідок певної інерційності може невчасно компенсувати підвищення тиску на виході НПС, яке може перевищити допустиме значення із умови міцності матеріалу труби. Підвищення тиску на вході і виході НПС, а також у довільній точці траси нафтопроводу викликає додаткове навантаження на матеріал трубопроводу, що зменшує його несівну здатність.

Хвиля пониженого тиску поширюється в напрямі до НПС, що розташована далі за рухом потоку рідини. Поширення хвилі розрідження може призвести до неприпустимого зниження тиску в лінії всмоктування наступної НПС, що спричинює її відключення засобами САР.

Таким чином, більшість технологічних операцій, необхідних для керування роботою нафтопроводу, а також нештатні ситуації, що виникають спонтанно, характеризуються значними змінами тиску і здатні призвести до аварійної ситуації [1-7].

Ось чому дослідження впливу зупинок насосних агрегатів на режим експлуатації магістральних нафтопроводів має важливе теоретичне і практичне значення.

Технологічні операції зупинок і запусків насосних агрегатів у нафтопроводі супроводжується неусталеними гідродинамічними процесами, що мають аналогію з явищами гідравлічного удару. Визначну роль в дослідженні явища гідравлічного удару відіграла робота основоположника цієї теорії Н. Е. Жуковського. З фундаментальних робіт радянських учених з даних питань слід відмітити роботи І. А. Чарного.

У шістдесяті-сімдесяті роки минулого століття питання впливу зупинок насосних агрегатів на режим роботи магістральних нафтопроводів було об'єктом наукових досліджень низки радянських науковців. Так, у роботі [3] одержано розв'язок методом характеристик системи диференціальних рівнянь, що описують нестационарний процес, який виникає в нафтопроводі у разі відключення насосного агрегату на проміжній НПС. Слід зазначити, що застосування методики, запропонованої у роботі [3], передбачає наявність закономірностей зміни у часі обертової частоти вала насоса за його зупинки. Окрім того, адекватність даної методики перевірена результатами експериментальних досліджень на трубопроводі, оснащеному насосами старого параметричного ряду, які сьогодні не використовуються на вітчизняних нафтопроводах.

Для того, щоб встановити закономірності зміни тиску в нафтопроводі після зупинки одного або кількох насосів, необхідно знати закон зростання тиску у часі на вході НПС, на якій відбулася зміна кількості працюючих агрегатів. Цими питаннями предметно займалися у шістдесяті-вісімдесяті роки минулого століття Е. В. В'язунов, П. А. Мороз, Б. І. Голосовкер С. І. Перевощиков [4-6]. Методики розрахунку параметрів перехідних процесів, які були запропоновані у зазначених роботах, мали певні

недоліки та обмежену сферу застосування: не були враховані демпфуючі властивості трубопроводу, не був врахований той факт, що закон подібності відцентрових насосів виконуються тільки у певному діапазоні зміни обертової частоти.

Існуючі методики прогнозування параметрів перехідних процесів базуються на використанні залежностей, які можуть бути застосовані лише за реалізації в нафтопроводах прямих гідравлічних ударів. Ці явища можуть мати місце за раптового повного закриття запірної арматури на трасі нафтопроводу та повного припинення процесу перекачування нафти. На відміну від класичного гідравлічного удару, в процесі зупинки одного чи кількох насосів зазвичай не відбувається повного припинення процесу перекачування. Витрата транспортованої рідини в трубопроводі лише зменшується на певну величину. За будь-якої зупинки одного чи кількох насосів на НПС виникає процес, який частково нагадує непрямий гідравлічний удар. Гідродинаміку такого процесу не можна достовірно розраховувати за традиційними методиками.

Викладене вище засвідчує, що в наявних на сьогодні наукових роботах, що стосуються теми досліджень, здебільшого розглядалися закономірності зміни тиску рідини на вході і виході НПС за зупинки одного чи кількох насосів. Закономірності зміни тиску нафти по трасі нафтопроводу, спричинені зупинками насосних агрегатів, у теоретичному плані розглянуті недостатньо. Окрім того, більшість теоретично одержаних розрахункових залежностей не підтверджені достатньою кількістю дослідних даних, одержаних на діючих магістральних нафтопроводах, оснащених сучасними насосними агрегатами.

Нами спільно із працівниками нафтопровідного управління на вітчизняному магістральному нафтопроводі проведено широкомасштабні експериментальні дослідження закономірностей перехідних процесів, спричинених зупинками насосних агрегатів. Результати зазначених експериментальних досліджень наведено у роботі [7]. Шляхом опрацювання дослідних даних одержано графічні та аналітичні залежності зміни у часі тиску нафти на вході НПС, на виході НПС, а також у будь-якій точці траси нафтопроводу. Встановлено, у міру просування хвилі підвищеного тиску трасою нафтопроводу амплітуда стрибкоподібного підвищення тиску зменшується за експоненціальним законом. При цьому для кожного режиму експлуатації нафтопроводу, для кожної виробничої ситуації коефіцієнт затухання хвилі підвищеного тиску має своє значення [7].

Оскільки провести експериментальні дослідження та одержати дослідні значення коефіцієнта затухання хвилі тиску для всіх режимів роботи нафтопроводу неможливо, то необхідним є виконання теоретичних досліджень, які б дали можливість одержати аналітичні залежності коефіцієнта затухання хвилі підвищеного тиску від геометричних характеристик

трубопроводу, фізичних властивостей транспортованої нафти та режимних параметрів її перекачування.

**Мета і задачі досліджень.** Метою роботи є встановлення у результаті теоретичних досліджень закономірностей зміни тиску в магістральному нафтопроводі за перехідних процесів, спричинених зупинками насосних агрегатів.

У процесі досліджень вирішувались такі задачі:

1) оцінювання швидкості поширення хвилі тиску у магістральному нафтопроводі;

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

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

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

**Предмет дослідження** – неусталені гідродинамічні процеси, що виникають під час зупинок насосних агрегатів.

**Методи дослідження** – математичне моделювання закономірностей гідродинамічних перехідних процесів у нафтопроводах за допомогою програмного комплексу OLGA7.

Математична модель неусталеної течії малов'язкої рідини в трубопроводі базується на застосуванні такої системи диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\lambda w |w|}{2d} = 0, \\ \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial t} + c^2 \frac{\partial w}{\partial x} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

де  $P$  - зведений тиск,

$$P = \rho g z + P_c, \quad (2)$$

$\rho$  - густина рідини за умов перекачування;

$g$  - прискорення сили тяжіння;

$z$  - геодезична позначка осі трубопроводу;

$P_c$  - величина статичного тиску в перерізі трубопроводу;

$w$  - усереднена за перерізом труби швидкість руху рідини;

$d$  - внутрішній діаметр трубопроводу;

$c$  - швидкість поширення звуку в трубопроводі;

$x$  - лінійна координата, що відлічується вздовж осі труби в напрямі руху рідини;

$t$  - часова координата.

Перше рівняння у системі (1) – це закон зміни кількості руху (рівняння руху потоку), а друге – закон збереження маси потоку рідини (рівняння нерозривності потоку). Для проведення гідродинамічних розрахунків перехідних процесів систему рівнянь (1) необхідно розв'язати спільно з початковими та граничними умовами, а також із умовами сумісності, що

моделюють роботу технологічного обладнання на нафтопроводі.

Оскільки система рівнянь (1) не розв'язується аналітично в явному вигляді, для одержання розв'язків необхідно застосовувати ті чи інші числові методи, які реалізуються за допомогою комп'ютерних технологій.

Саме із розвитком високошвидкісних комп'ютерів почалася нова ера у сфері теоретичних досліджень перехідних процесів у трубопроводах. Швидкодіюча обчислювальна техніка дала змогу значно скоротити час проведення розрахунків. З'явилася можливість створювати теоретичні розрахункові моделі складних трубопровідних систем.

При виконанні теоретичних досліджень методом математичного моделювання з використанням комп'ютерних технологій застосовуються два підходи. Перший із них полягає у розробці оригінального програмного забезпечення для розв'язання системи диференціальних рівнянь (1) з урахуванням специфіки об'єкта дослідження. Недоліком такого підходу є доведення адекватності запропонованої комп'ютерної моделі, тобто необхідність порівняння одержаних результатів з результатами розрахунку за перевіреними та узаконеними програмними продуктами. За другого підходу для розв'язування задачі використовується ліцензоване стандартизоване програмне забезпечення, яке за правильного застосування гарантує одержання адекватних результатів.

Одним з основних напрямів науково-технічного прогресу в процесах видобутку і транспортування вуглеводнів є розвиток технологій комп'ютерного імітаційного моделювання. Програмний комплекс OLGA7, розроблений норвезькою компанією SPT Group (Scandpower Petroleum Technology AS), дає можливість виконувати дослідження шляхом імітаційного моделювання систем будь-якої складності.

На даний час останньою версією даної програми є OLGA7, яка розроблена в 2012 році. У світовій практиці комп'ютерна програма OLGA7 широко застосовується при проектуванні об'єктів газової та нафтової промисловості. Жоден серйозний розрахунок газопроводу або нафтопроводу не здійснюється без імітаційного моделювання газопроводу (робоче тіло – газ) або нафтопроводу (робоче тіло – нафта). Стосовно експлуатації магістральних нафтопроводів, програмний комплекс OLGA7 дає можливість моделювати складні виробничі ситуації, спричинені нестационарними гідродинамічними процесами, заздалегідь передбачити різноманітні ефекти, пов'язані з нестабільністю потоку в трубопроводі, прогнозувати будь-які штатні ситуації, визначати ефективність тих чи інших заходів щодо запобігання аваріям та нештатним ситуаціям.

Враховуючи зазначене вище, програмний комплекс OLGA7 нами використаний для математичного моделювання неусталених гідродинамічних процесів у разі зупинок насосних агрегатів на магістральному нафтопроводі.

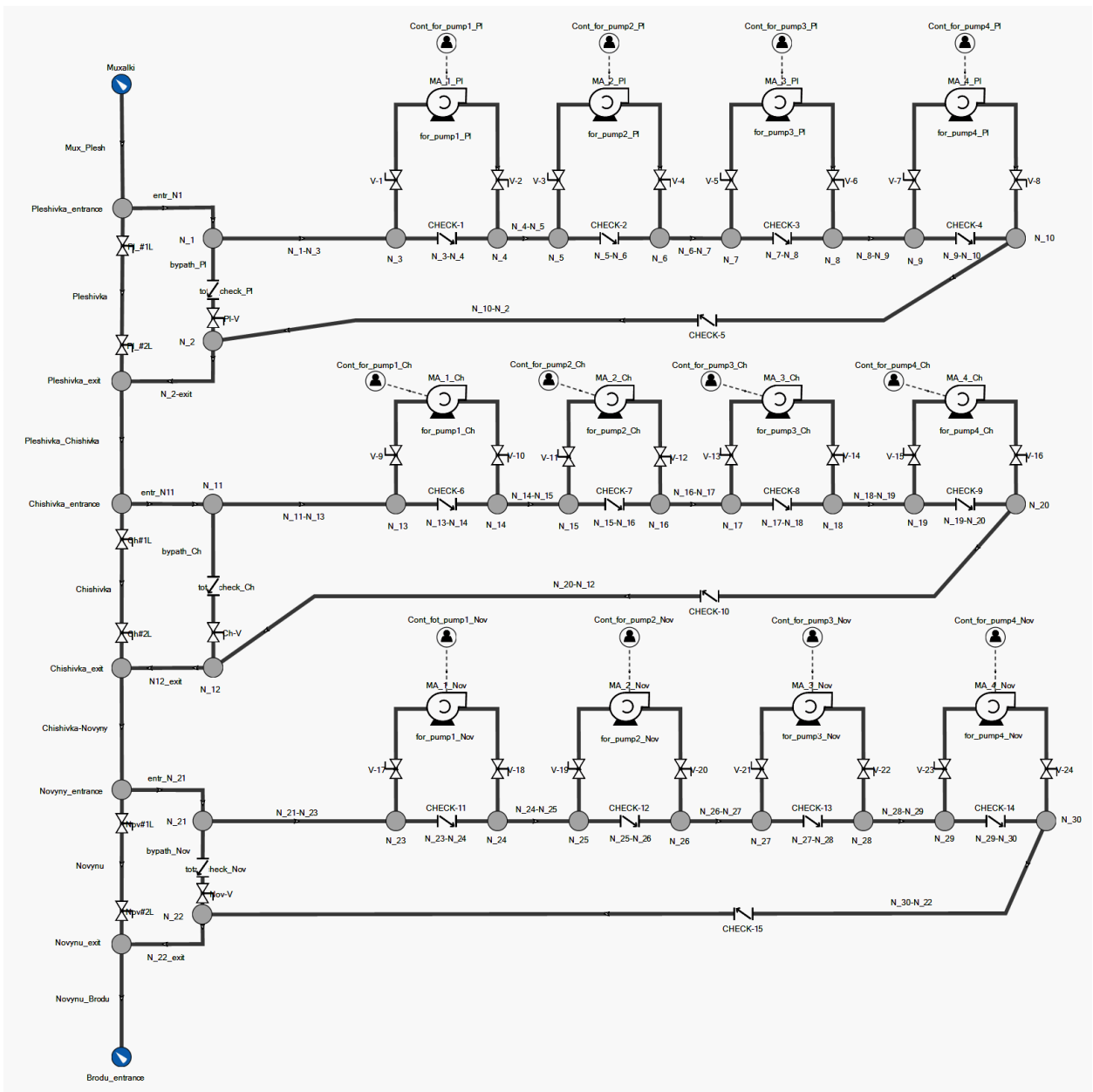


Рисунок 1 – Принципова розрахункова схема нафтопроводу в програмному комплексі OLGA7

Математичне моделювання неусталених гідродинамічних процесів розпочалося із створення у середовищі програмного комплексу OLGA7 розрахункової моделі магістрального нафтопроводу. Принципову розрахункову схему об'єкта математичного моделювання в середовищі OLGA7 зображено на рисунку 1.

У програмний комплекс OLGA7 для моделювання неусталених режимів роботи нафтопроводу необхідно ввести такі дані:

- фізичні властивості транспортованої нафти (густина та динамічну в'язкість за умов перекачування);
- профіль траси нафтопроводу та кліматичні умови в районі його прокладання;
- масиви відстаней між НПС, геодезичних позначок НПС, внутрішніх діаметрів всіх лінійних ділянок нафтопроводу, мінімально допустимих тисків на вході в кожну НПС, макси-

мально допустимих робочих тисків на всіх лінійних ділянках;

- дані з паспортних (фактичних) характеристик насосів (напір, потужність, коефіцієнт корисної дії), що встановлені на головній і проміжних НПС.

Спочатку за програмою OLGA7 імітувався усталений режим експлуатації для певної схеми роботи насосів на НПС, певної схеми роботи лінійної частини, заданих технологічних обмежень щодо тиску і конкретних фізичних властивостей транспортованої нафти. Визначалася пропускна здатність нафтопроводу і режим роботи кожної НПС: тиск нафти на вході і виході, ККД насосів, необхідна величина дроселювання тощо.

Одержані дані порівнювались з результатами аналогічних розрахунків зазначеного нафтопроводу у разі усталеного режиму роботи за

Таблиця 1 – Швидкість поширення хвилі тиску в нафтопроводі, визначена із застосуванням програми OLGA7

Місцезнаходження	Віддаль від місця виникнення хвилі, км	Час проходження хвилі тиску до вибраної точки, с	Швидкість поширення хвилі тиску, м/с
Режим 18.01.2012 року, НПС 2, (зупинка МА№1,3)			
НПС 3	0	0	–
КП6	27	25,2	1071
КП5	51	46,2	1104
КП4	76	70,2	1083
НПС 2	96	88,2	1088
КП3	117	106,8	1096
КП2	126	115,2	1094
КП1	141	127,8	1103
	Середня швидкість		1091
Режим 25.04.2012 року, НПС 4 (зупинка МА№1)			
НПС 4	0	0	–
КП10	7	6,0	1167
КП9	24	21,6	1111
КП8	54	49,2	1098
КП7	78	70,2	1111
НПС 3	97	90,0	1078
КП6	124	111,0	1117
КП5	148	133,6	1108
	Середня швидкість		1113
Режим 23.04.2012 року, НПС 4 (зупинка МА№3)			
НПС 4	0	0	–
КП10	7	6,4	1094
КП9	24	22,2	1081
КП8	54	50,4	1071
КП7	78	71,2	1096
НПС 3	97	88,0	1102
КП6	124	113,2	1095
КП5	148	135,0	1096
	Середня швидкість		1091

розробленою нами програмою RozPr, що створена у середовищі Visual Basic із застосуванням електронних таблиць Microsoft Excel. Аналіз засвідчив, що результати розрахунків за двома програмами практично збігаються.

Результати розрахунку усталеного режиму експлуатації модельного нафтопроводу слугували початковими умовами для розв'язування системи диференціальних рівнянь (1) числовими методами за допомогою програмного комплексу OLGA7.

Як початкову умову приймали знайдену експериментальним шляхом [6] закономірність зміни у часі тиску нафти на вході НПС, спричинену зупинкою насосів. Тиск нафти у кінці ділянки під час першого етапу перехідного процесу вважався сталою величиною.

Шляхом математичного моделювання за програмою OLGA7 знайдено теоретичне значення швидкості поширення хвиль тиску в досліджуваному нафтопроводі. У таблиці 1 наве-

дено результати визначення цього параметра для режиму експлуатації нафтопроводу, що був реалізований 18 січня 2012 року. Теоретично одержане значення швидкості поширення хвиль тиску в нафтопроводі практично збігається із значенням, яке було визначене дослідним шляхом. Різниця результатів не перевищує 1 %, що знаходиться у межах точності гідродинамічних розрахункових формул.

За допомогою програмного комплексу OLGA7 проведено моделювання процесу зупинки магістрального насоса МА№1 на НПС 4, що відбулось 25 квітня 2012 року. Витрата нафти до зупинки становила 1689 м<sup>3</sup>/год.

У результаті теоретичним шляхом одержано такі графічні закономірності стрибкоподібних змін тиску у різних точках траси нафтопроводу за час перехідного процесу, спричиненого зупинкою насосного агрегату на НПС 4 (див. рисунки 2,3). Аналіз засвідчив, що тенденції стрибкоподібних змін тиску, одержані теорети-

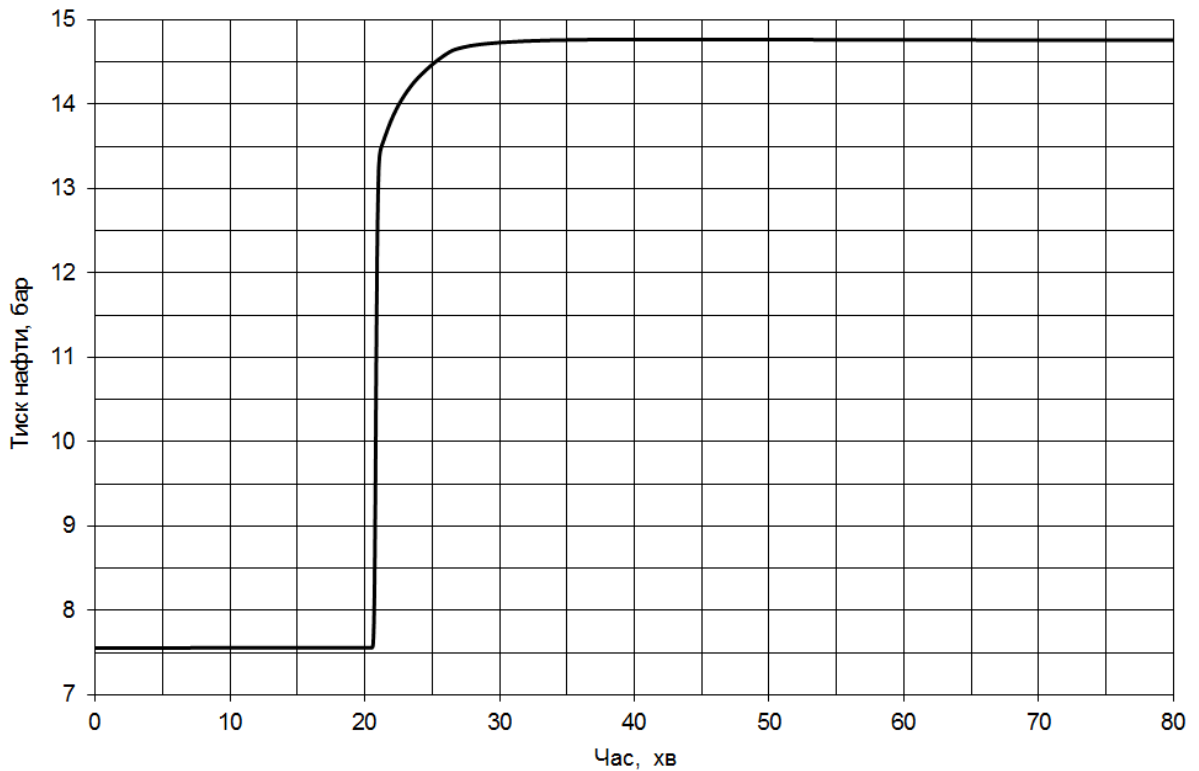


Рисунок 2 – Зміна тиску нафти на відстані 25 км від НПС 4 в момент зупинки насосного агрегата за результатами розрахунку в програмі OLGA7 (витрата нафти до зупинки 1689 м<sup>3</sup>/год)

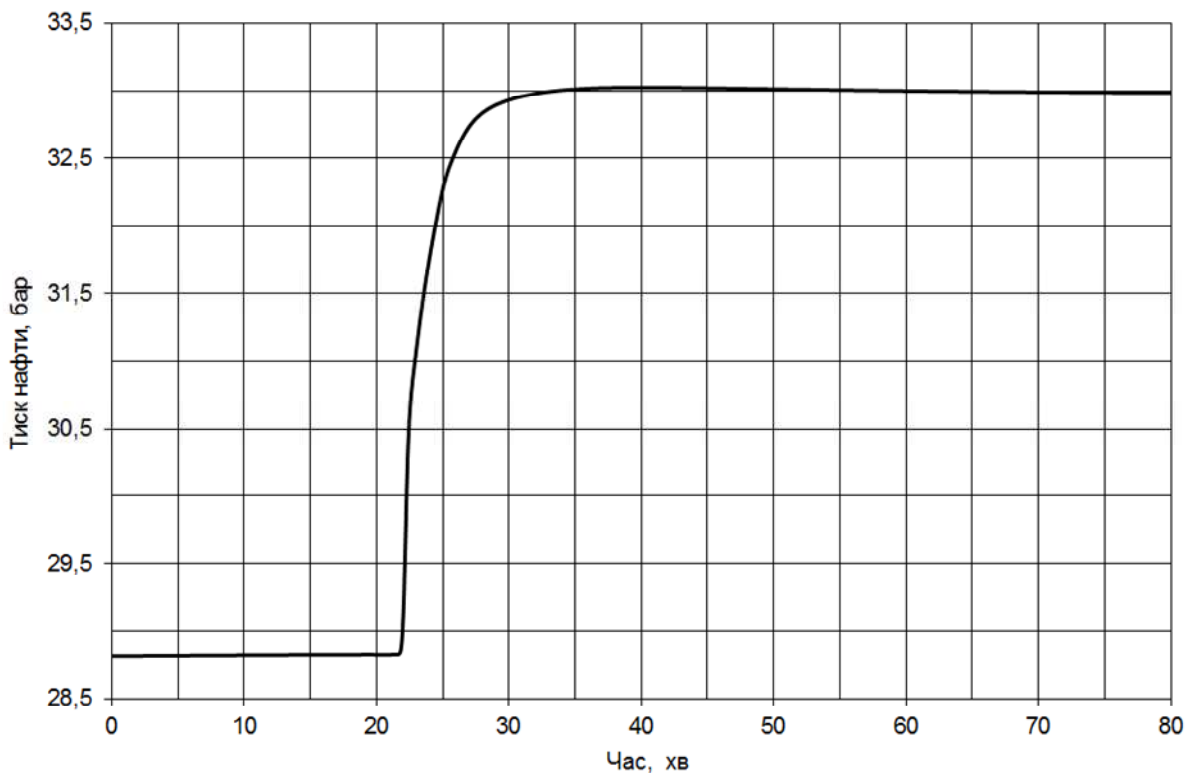
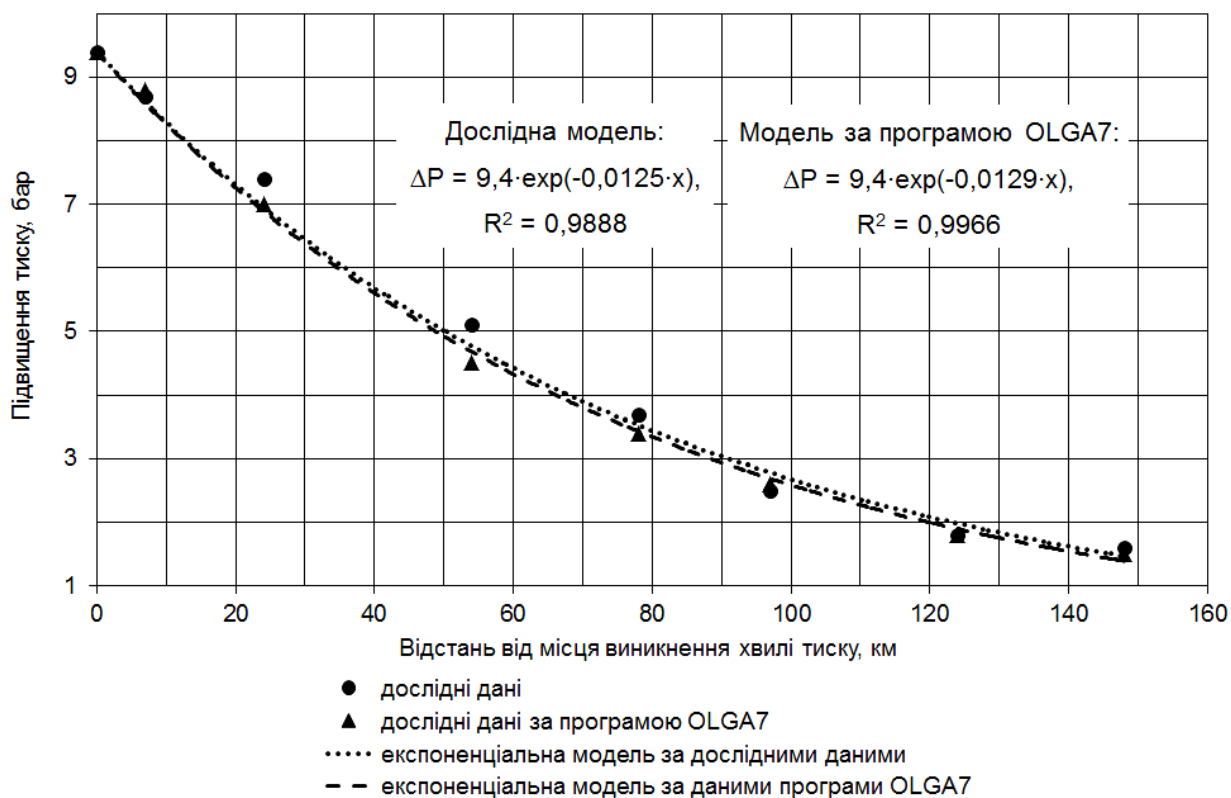


Рисунок 3 – Зміна тиску нафти на відстані 97 км від НПС 4 в момент зупинки насосного агрегата за результатами розрахунку в програмі OLGA7 (витрата нафти до зупинки 1689 м<sup>3</sup>/год)

чно, аналогічні тим, що виявлені дослідним шляхом.

На рисунку 4 зображені одержані теоретично за програмою OLGA7 і визначені експериментальним шляхом графічні закономірності зміни по довжині нафтопроводу величини

стрибокподібного підвищення тиску, спричиненого зупинкою насосного агрегата для режиму експлуатації, що мав місце 25 квітня 2012 року. Виконано їх математичне моделювання експоненціальними функціями засобами Microsoft Excel.



**Рисунок 4 – Залежність величини стрибкоподібного підвищення тиску нафти від відстані до НПС 4, де зупинили насосний агрегат, за теоретичними розрахунками та результатами експерименту (витрата нафти до зупинки 1689 м³/год)**

Порівняння теоретично прогнозованих та фактично зафіксованих закономірностей стрибкоподібних змін тиску за перехідного процесу, спричиненого зупинкою насосного агрегата, засвідчило збіжність результатів для досліджуваного режиму експлуатації.

Для режиму експлуатації нафтопроводу, що був реалізований 23 квітня 2012 року, результати порівняння теоретичних та дослідних закономірностей зміни величини стрибкоподібного підвищення тиску по трасі нафтопроводу відображено на рисунку 5.

З метою одержання математичних моделей коефіцієнта затухання хвилі підвищеного тиску як функції режимних параметрів і фізичних властивостей нафти за програмою OLGA7 виконано багатоваріантні гідродинамічні розрахунки модельного нафтопроводу у разі зупинки одного і двох насосних агрегатів на НПС 2. Аналізували закономірності зміни амплітуди хвилі підвищеного тиску на відстані до 200 км. У процесі досліджень витрату нафти в модельному нафтопроводі змінювали у межах від 1000 до 2700 м³/год, розрахункову кінематичну в'язкість варіювали у діапазоні від 10 до 30 сСт.

Ці значення відповідають фактичним режимам експлуатації нафтопроводу, що досліджувався. Приймали, що величина стрибкоподібного підвищення тиску на вході НПС у разі зупинки одного насоса становить 10 бар, у разі зупинки двох послідовно працюючих насосів – 20 бар. За допомогою програми OLGA7 визначали теоретичну величину стрибкоподібного

зростання тиску у кількох точках траси нафтопроводу, а також на вході НПС, які розміщені до місця відключення насосів (за рухом потоку нафти). Розрахунок одного неусталеного режиму роботи модельного нафтопроводу за програмою OLGA7 тривав протягом двох годин.

За результатами розрахунків побудовані графічні залежності коефіцієнта затухання хвилі підвищеного тиску від відстані до місця виникнення збурення. Методом найменших квадратів визначено коефіцієнт затухання хвилі тиску для певних значень об'ємної витрати в трубопроводі до зупинки насоса та фізичних властивостей нафти. Приклад одержаних результатів для одного із досліджень наведено на рисунку 6.

Аналіз засвідчив, що для всіх теоретично розроблених математичних моделей коефіцієнта затухання хвилі підвищеного тиску за перехідних режимів роботи модельного нафтопроводу значення коефіцієнта детермінації перевищує 99 %. Це підтверджує адекватність теоретично одержаних закономірностей зміни величини підвищення тиску по довжині модельного нафтопроводу.

Для прогнозування динаміки зміни по довжині нафтопроводу величини стрибкоподібного підвищення тиску, спричиненого зупинкою одного або кількох насосних агрегатів, коефіцієнт затухання хвилі тиску необхідно виразити як функцію режимних параметрів роботи нафтопроводу і фізичних властивостей транспортованої нафти.

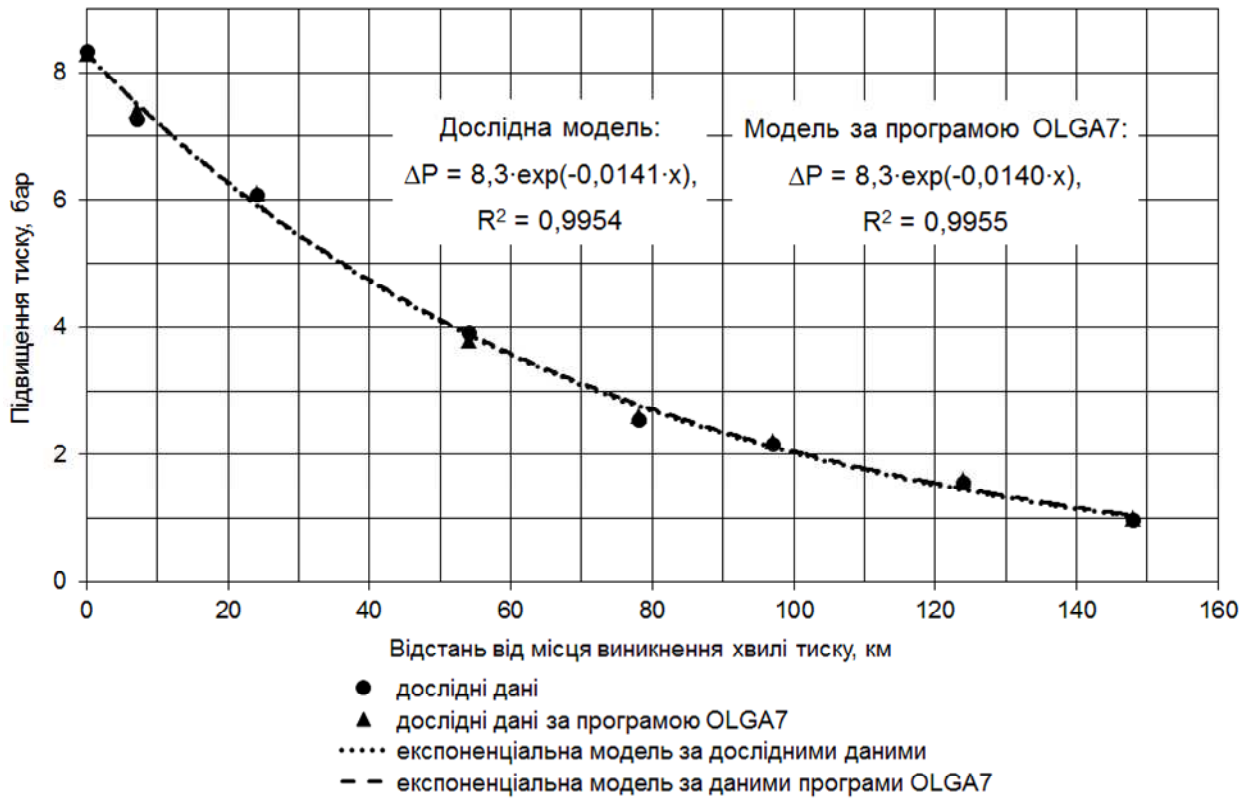


Рисунок 5 – Залежність величини стрибкоподібного підвищення тиску нафти від відстані до НПС 4, де зупинили насосний агрегат, за теоретичними розрахунками та результатами експерименту (витрата нафти до зупинки 2096 м<sup>3</sup>/год)

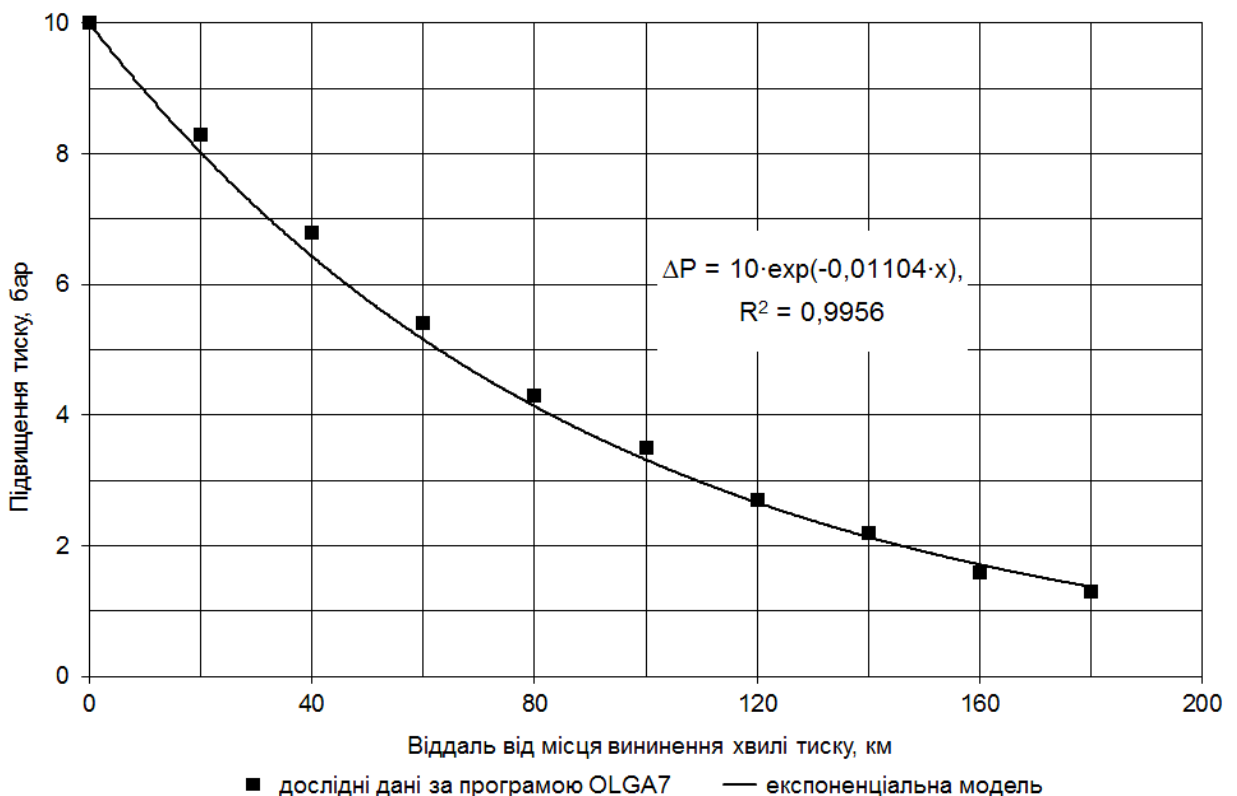


Рисунок 6 – Залежність величини стрибкоподібного підвищення тиску нафти в модельному нафтопроводі від відстані до місця збурення ( $\rho = 866 \text{ кг/м}^3$ ,  $\nu = 15,6 \text{ сСт}$ , витрата нафти до зупинки  $Q = 1400 \text{ м}^3/\text{год}$ ) за результатами розрахунків програмного комплексу OLGA7



Враховуючи гідродинамічні підходи та здобутки інших вчених із зазначених питань, можна прогнозувати, що для нафтопроводу з конкретними геометричними характеристиками і відомою швидкістю поширення звуку коефіцієнт затухання хвилі тиску може бути виражений як функція витрати нафти до зупинки, числа Рейнольдса та кінематичної в'язкості нафти. Окрім того, його значення буде залежати від ударного тиску, який, у свою чергу, залежить від кількості одночасно зупинених чи запущених в роботу насосів.

На основі результатів розрахунків перехідних процесів в модельному нафтопроводі за програмою OLGA7 запропонована математична модель для розрахунку коефіцієнта затухання хвилі підвищеного тиску у вигляді

$$K_3 = A \cdot \text{Re}^2 + B \cdot \text{Re} + C, \quad (3)$$

де  $A, B, C$  - коефіцієнти математичної моделі, що розраховуються залежно від в'язкості транспортованої нафти:

- у випадку зупинки одного насосного агрегата

$$A = 3,094 \cdot 10^{-14} \cdot \nu^2 - 1,563 \cdot 10^{-12} \cdot \nu + 1,335 \cdot 10^{-11}, \quad (4)$$

$$B = -2,489 \cdot 10^{-9} \cdot \nu^2 + 1,121 \cdot 10^{-7} \cdot \nu - 5,754 \cdot 10^{-7}, \quad (5)$$

$$C = 3,376 \cdot 10^{-5} \cdot \nu^2 - 7,869 \cdot 10^{-4} \cdot \nu - 3,577 \cdot 10^{-3}, \quad (6)$$

- у випадку зупинки двох послідовно працюючих насосних агрегатів

$$A = 2,853 \cdot 10^{-15} \cdot \nu^2 + 1,019 \cdot 10^{-13} \cdot \nu - 7,735 \cdot 10^{-13}, \quad (7)$$

$$B = 2,899 \cdot 10^{-10} \cdot \nu^2 - 8,250 \cdot 10^{-9} \cdot \nu - 6,612 \cdot 10^{-8}, \quad (8)$$

$$C = -6,035 \cdot 10^{-6} \cdot \nu^2 + 2,880 \cdot 10^{-4} \cdot \nu + 8,970 \cdot 10^{-4}, \quad (9)$$

де  $\nu$  - кінематична в'язкість нафти за умов перекачування, сСт.

Ступінь достовірності розробленої математичної моделі (3) вищий за 99 %, що свідчить про її адекватність та відповідність результатам теоретичних досліджень закономірностей перехідних процесів методами математичного моделювання за програмою OLGA7.

Для визначення можливості застосування формул (3)-(9) для прогнозування величини стрибкоподібного підвищення тиску при зупинці одного або кількох насосних агрегатів на НПС магістрального виконано порівняння дослідних даних із результатами розрахунків за аналітичними залежностями. Аналіз засвідчив, що максимальне відхилення теоретично прогнозованих за формулами (3)-(9) результатів від експериментальних значень не перевищує мінус 7 % - плюс 5 %.

Опрацювання результатів математичного моделювання перехідних процесів у нафтопроводі, спричинених зупинкою насосних агрегатів, дало підстави запропонувати таку спрощену розрахункову формулу для коефіцієнта затухання хвилі підвищеного тиску:

- у випадку зупинки одного насосного агрегата

$$K_3 = \frac{4 \cdot 10^{-4} Q_{zod}^{0,75}}{\text{Re}^{0,2}}, \quad (10)$$

- у випадку зупинки двох послідовно працюючих насосних агрегатів

$$K_3 = \frac{1,35 \cdot 10^{-5} Q_{zod}^{1,1}}{\text{Re}^{0,15}}, \quad (11)$$

де  $Q_{zod}$  - об'ємна витрати нафти у момент зупинки насосів.

Аналіз засвідчив, що максимальне відхилення теоретично прогнозованих за формулами (10)-(11) результатів від експериментальних значень не перевищує мінус 9 % - плюс 4 %. Ці формули можуть бути застосовані для оперативного прогнозування параметрів перехідних процесів нафтопроводу.

Наведені вище математичні моделі для коефіцієнта затухання хвилі підвищеного тиску в нафтопроводі одержані методом підбору числових коефіцієнтів та показників степеня при впливових режимних параметрах.

Під час розроблення математичних моделей за результатами експериментальних досліджень широко застосовується метод найменших квадратів. Імітаційні багатоваріантні розрахунки, які виконуються за програмним комплексом OLGA7, можна вважати своєрідним математичним експериментом, що проводиться з використанням комп'ютерних технологій. Тому застосуємо метод найменших квадратів для одержання уточнених математичних моделей коефіцієнта затухання хвилі підвищеного тиску в нафтопроводі при перехідних процесах, спричинених зупинками насосних агрегатів.

Коефіцієнт затухання хвилі підвищеного тиску в нафтопроводі подаватимемо степеневою функцією годинної витрати нафти до зупинки  $Q_{zod}$  і числа Рейнольдса  $\text{Re}$

$$K_3 = a Q_{zod}^b \text{Re}^c, \quad (12)$$

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

Для одержання математичних виразів для коефіцієнтів моделі методом найменших квадратів виконаємо логарифмування правої та лівої частини рівняння (12)

$$\ln K_3 = \ln a + b \ln Q + c \ln \text{Re}. \quad (13)$$

Введемо позначення:

$$z = \ln K_3, \quad x = \ln Q, \quad y = \ln \text{Re}; \quad (14)$$

$$A = \ln a, \quad B = b, \quad C = c.$$

Рівняння (12) із врахуванням (14) набуває вигляду

$$z = A + Bx + Cy. \quad (15)$$

Записуємо рівняння, яке необхідно дослідити на мінімум, використовуючи метод найменших квадратів

$$F = \sum_{i=1}^n (z_i - A - Bx_i - Cy_i)^2, \quad (16)$$

де  $n$  - кількість вимірювань;

$z_i$  - значення функції для  $i$ -ого вимірювання;

$x_i, y_i$  - значення аргументів функції для  $i$ -ого вимірювання.

Знаходимо частинні похідні, прирівнюємо їх до нуля, у результаті одержуємо систему рівнянь для визначення коефіцієнтів регресійної моделі

$$\begin{cases} An + B\sum_{i=1}^n x_i + C\sum_{i=1}^n y_i = \sum_{i=1}^n z_i, \\ A\sum_{i=1}^n x_i + B\sum_{i=1}^n x_i^2 + C\sum_{i=1}^n x_i y_i = \sum_{i=1}^n x_i z_i, \\ A\sum_{i=1}^n y_i + B\sum_{i=1}^n x_i y_i + C\sum_{i=1}^n y_i^2 = \sum_{i=1}^n y_i z_i. \end{cases} \quad (17)$$

Розв'язавши систему рівнянь (17) із урахуванням позначень (14), одержуємо значення коефіцієнтів математичної моделі (12)

$$a = \exp(A), \quad b = B, \quad c = C. \quad (18)$$

Далі визначаємо величину дисперсії адекватності  $D_a$  та стандарт вибірки  $s$ . Для підвищення адекватності розроблених моделей серед даних математичного експерименту необхідно виявити ті, які є помилковими. Для цього кожену точку вибірки слід перевірити на виконання умови Ст'юдента.

Уточнені математичні моделі для коефіцієнта затухання хвилі підвищеного тиску в нафтопроводі, що досліджувався, мають такий вигляд:

- у випадку зупинки одного насосного агрегата

$$K_3 = 2,92 \cdot 10^{-4} \frac{Q_{200}^{0,724}}{Re^{0,15}}, \quad (19)$$

- у випадку зупинки двох послідовно працюючих насосних агрегатів

$$K_3 = 2,85 \cdot 10^{-6} \frac{Q_{200}^{1,375}}{Re^{0,20}}. \quad (20)$$

Аналіз засвідчив, що максимальне відхилення теоретично прогнозованих за формулами (19)-(20) результатів від експериментальних значень не перевищує  $\pm 7\%$ . Ці формули можуть бути застосовані для більш точного прогнозування параметрів перехідних процесів досліджуваного нафтопроводу.

Покажемо методику практичного застосування одержаних теоретичним шляхом математичних моделей. Розглянемо режим роботи нафтопроводу, що мав місце 25 квітня 2012 року. Схема роботи насосів була така: на НПС 1 працювали насос підпірний №1 та насос магістральний №2, на НПС 2 працював насос магістральний №3, на НПС 3 працював насос магістральний №3, на НПС 4 працював насос магістральний №1. Густина транспортованої нафти згідно з лабораторними даними становила  $\rho = 872 \text{ кг/м}^3$ , кінематична в'язкість нафти  $\nu = 21,8 \text{ сСт}$ . О 20 год 10 хв відбулася зупинка насосного агрегату №1 на НПС 4. Це спричинило стрибкоподібну зміну тиску на її вході, подальше виникнення хвилі підвищеного тиску, яка зі швидкістю звуку поширювалася тру-

бопроводом до НПС 2 і далі до початку нафтопроводу.

Для оцінювання параметрів перехідного процесу, використовуючи програму RozPr, визначаємо пропускну здатність нафтопроводу за заданої схеми роботи насосів на кожній НПС. У результаті одержуємо, що робоча витрата і швидкість руху нафти в трубопроводі до зупинки насоса становили

$$Q_{200} = 1689 \text{ м}^3/\text{год}, \quad w = 1,212 \text{ м/с}.$$

Визначимо значення коефіцієнта затухання хвилі підвищеного тиску за формулою (3). Спочатку за формулами (4)-(6) обчислюємо значення коефіцієнтів математичної моделі

$$A = 3,094 \cdot 10^{-14} \cdot 21,8^2 - 1,563 \cdot 10^{-12} \cdot 21,8 + 1,335 \cdot 10^{-11} = -6,026 \cdot 10^{-12};$$

$$B = -2,489 \cdot 10^{-9} \cdot 21,8^2 + 1,121 \cdot 10^{-7} \cdot 21,8 - 5,754 \cdot 10^{-7} = 6,858 \cdot 10^{-7};$$

$$C = 3,3766 \cdot 10^{-5} \cdot 21,8^2 - 7,869 \cdot 10^{-4} \cdot 21,8 - 3,577 \cdot 10^{-3} = -4,690 \cdot 10^{-3}.$$

Знаходимо число Рейнольда в нафтопроводі

$$Re = \frac{4 \cdot 1689}{3600 \cdot \pi \cdot 0,702 \cdot 21,8 \cdot 10^{-6}} = 39054.$$

Значення коефіцієнта затухання хвилі підвищеного тиску згідно з формулою (3) дорівнює

$$K_3 = -6,026 \cdot 10^{-12} \cdot 39054^2 + 6,858 \cdot 10^{-7} \cdot 39054 - 4,690 \cdot 10^{-3} = 0,0129 \text{ км}^{-1}.$$

Обчислюємо значення коефіцієнта затухання хвилі підвищення тиску за спрощеною формулою (10)

$$K_3 = \frac{4 \cdot 10^{-4} \cdot 1689^{0,75}}{39054^{0,2}} = 0,0127 \text{ км}^{-1}.$$

Визначаємо значення коефіцієнта затухання хвилі підвищення тиску за формулою (19)

$$K_3 = 2,92 \cdot 10^{-4} \frac{1689^{0,724}}{39054^{0,15}} = 0,0130 \text{ км}^{-1}.$$

Дослідне значення коефіцієнта затухання хвилі підвищення тиску для даного режиму роботи нафтопроводу дорівнювало

$$K_{3,д.} = 0,0125 \text{ км}^{-1}.$$

Теоретичні значення коефіцієнта затухання хвилі підвищення тиску, розраховані за трьома різними аналітичними залежностями, близькі між собою і добре узгоджуються із дослідним значенням зазначеного параметра для режиму роботи нафтопроводу, що розглядається.

Згідно з дослідними даними величина стрибкоподібного підвищення тиску на вході НПС 4 для даного режиму роботи нафтопроводу становила

$$\Delta P_n = 9,4 \text{ бар}.$$

Величину стрибкоподібного підвищення тиску на відстані  $x$  від місця виникнення хвилі тиску визначаємо за формулою

$$\Delta P = \Delta P_n \exp(-K_3 x), \quad (21)$$

Визначимо величину стрибкоподібного підвищення тиску на виході НПС 3 за зупинки насоса №1 на НПС 4:

- з використанням формул (3)-(6)

$$\Delta P = 9,4 \cdot \exp(-0,0129 \cdot 97) = 2,7 \text{ бар};$$

- з використанням формули (10)

$$\Delta P = 9,4 \cdot \exp(-0,0127 \cdot 97) = 2,7 \text{ бар};$$

- з використанням формули (19)

$$\Delta P = 9,4 \cdot \exp(-0,0130 \cdot 97) = 2,7 \text{ бар}.$$

Дослідне значення стрибкоподібного підвищення тиску, зафіксоване відповідними приладами для даного режиму роботи нафтопроводу, становило

$$\Delta P_0 = 2,8 \text{ кгс/см}^2 = 2,7 \text{ бар}.$$

Не дивлячись на невелику різницю у значеннях коефіцієнта затухання хвилі підвищеного тиску, величина розрахованого за всіма пропонуваними методиками значення стрибкоподібного зростання тиску на виході попередньої НПС є практично однаковою і збігається з його дослідним значенням для режиму роботи нафтопроводу, що розглядається. У той же час результати розрахунку величини підвищення тиску за традиційною методикою помітно відрізняються від дослідних значень.

Таким чином, усі запропоновані математичні моделі, що пропонуються, дають змогу достовірно прогнозувати закономірності зміни тиску при перехідних процесах, спричинених зупинками насосних агрегатів.

Результати теоретичних досліджень щодо впливу зупинок насосних агрегатів на режим роботи магістрального нафтопроводу, дали підстави зробити такі висновки:

1) Математичне моделювання неусталених гідродинамічних процесів у магістральних нафтопроводах, доцільно виконувати за допомогою комп'ютерних технологій з використанням програмного комплексу OLGA7.

2) Знайдено теоретичне значення швидкості поширення хвилі тиску в нафтопроводі, що досліджувався. Воно практично співпало із значенням, визначеним у процесі проведення промислових експериментів. Різниця результатів не перевищує 1 %, що знаходиться у межах точності гідродинамічних формул.

3) Запропоновано аналітичні залежності для коефіцієнта затухання хвилі тиску в нафтопроводі у випадку зупинки одного, двох і трьох послідовно працюючих на НПС насосів як функцію витрати нафти, режиму руху та кінематичної в'язкості нафти.

4) Математичні моделі, одержані теоретичним шляхом, передбачають широкий діапазон зміни як витрати нафти в нафтопроводі, так і в'язкості транспортованої нафти. Достовірність моделей підтверджена даними промислових експериментів. Тому їх доцільно застосовувати для прогнозування параметрів перехідних про-

цесів, спричинених зупинками насосних агрегатів нафтопроводу, що досліджувався.

В подальшому на основі отриманих теоретичних залежностей та результатів промислових експериментів планується розробити комплексну методику розрахунку гідродинамічних процесів, що виникають внаслідок зупинки насосних агрегатів та НПС магістральних нафтопроводів.

### *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. В. Полянская // Нефтяное хозяйство. – 1965. – № 5. – С. 63-68.

4 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.

5 Вязунов Е. В. Исследование переходных процессов в трубопроводе / Е. В. Вязунов, Б. И. Голосовкер, В. И. Голосовкер // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – 1970. – №10. – С. 3-6.

6 Перевощиков С. И. Определение изменения давления в нефтепроводах при неуставившемся течении жидкости / С. И. Перевощиков // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – 1981. – №2. – С. 6-9.

7 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.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
20.01.14*

*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)*