

## ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 621.646.94

### Аналіз доцільності використання газових акумуляторів для захисту нафтопроводів від гідравлічних ударів

І. Л. Бошкова<sup>1✉</sup>, Н. В. Волгушева<sup>2</sup>, О. С. Тітлов<sup>3</sup>, Е. І. Альтман<sup>4</sup>

<sup>1-4</sup>Одеський національний технологічний університет, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна

✉ e-mail: <sup>1</sup>boshkova.irina@gmail.com

ORCID: <sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0001-5989-9223>; <sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0002-9984-6502>;

<sup>3</sup><https://orcid.org/0000-0003-1908-5713>; <sup>4</sup><https://orcid.org/0000-0002-8934-2036>

*Досліджується доцільність використання газових ковпаків для запобігання аварійних ситуацій, обумовлених хвилями підвищеного тиску, що виникають у трубопроводі при зміні витрати перекачування в магістральних нафтопроводах. Визначено, що найбільш ефективним застосуванням газових ковпаків є захист коротких трубопроводів, тоді як системи згладжування хвиль тиску слід встановлювати на магістральних трубопроводах. Проведений аналіз систем з демпфіруючими пристроями у вигляді газових акумуляторів, для з'ясування ефективності застосування як засобів захисту трубопроводу від аварійних ситуацій. Визначені позитивні сторони використання газових ковпаків, до яких відноситься відсутність додаткових пристроїв, необхідних для зворотного закачування рідини з газового ковпака до магістрального трубопроводу після гідравлічного удару. При достатньому обсязі газової порожнини газовий ковпак так само, як і запобіжний клапан, хоча й меншою мірою, здатний зменшити амплітуду хвилі гідравлічного удару, проте головний його ефект полягає в іншому. Газовий ковпак зменшує швидкість збільшення тиску в трубопроводі і тим самим сприяє своєчасному відключенню насосів, що нагнітають рідину в трубопровод, інакше кажучи, запобігає можливій аварії. Проте на даний час не існує повністю опрацьованого пристрою газового ковпака, готового для застосування на нафтоперекачувальних станціях. Для забезпечення максимальної ефективності результатів дослідження були визначені критерії подібності, які дозволяють представити отримані результати критеріальною функціональною залежністю. Такий підхід дозволяє при обмеженій кількості експериментів дати оцінку подальшого ходу процесу та поведінки досліджуваної системи при різноманітних поєднаннях безрозмірних параметрів. Наведений розрахунковий приклад використання отриманих результатів, за яким демонструється вибір об'єму газової порожнини ковпака для захисту нафтопроводу.*

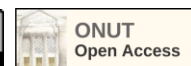
**Ключові слова:** Захист трубопроводу; Ефективність; Принципова схема; Визначальні параметри; Об'єм газової порожнини ковпака

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v58i4.2570>

© The Author(s) 2022. This article is an open access publication

This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



#### 1. Вступ

У багатьох випадках аварійні ситуації в магістральних нафтопроводах обумовлені хвилями підвищеного тиску, що виникають у трубопроводі при зміні витрати перекачування: гальмування

потoku нафти в трубі спричиняє збільшення тиску, а прискорення – хвилі розрідження. Гідравлічний удар створює ударну хвилю у вигляді різкої, майже миттєвої зміни її параметрів – тиску і швидкості, що поширюється в рідині фронту [1, 2]. При дуже великому збільшенні тиску гідравлічний

удар може викликати аварійні ситуації на трубопроводах, каналах та шлюзах. Для попередження гідравлічного удару на трубопроводах встановлюють запобіжні пристрої (клапани, зрівняльні резервуари, газові ковпаки, вентиля та ін.). Як системи захисту використовують запобіжні клапани (ЗК) або системи згладжування хвиль тиску, що забезпечують часткове відведення нафти з внутрішньої порожнини трубопроводу в спеціальну скидну ємність [3, 4]. Запобіжні клапани забезпечують скидання нафти у разі, якщо тиск у трубопроводі перевищить дозволений тиск на певну величину; системи згладжування хвиль тиску також відводять нафту з трубопроводу в скидну ємність, але тільки в тому випадку, якщо швидкість збільшення тиску перевищує максимально дозволена. В останньому випадку скидання нафти припиняється, як тільки тиск у трубопроводі стабілізується.

Відомі також газові ковпаки, що використовуються головним чином для згладжування високочастотних коливань тиску [5-7]. Газовий ковпак є замкнутою ємністю, частково заповненою інертним газом (наприклад, азотом) і вільно сполученою з нафтопроводом. При цьому початковий тиск у газовій порожнині ГП дорівнює тиску в нафтопроводі в тому перерізі, в якому до нього приєднано ковпак. При збільшенні тиску у нафтопроводі частина нафти, що транспортується, йде в ковпак, стискаючи газ, що знаходиться в ньому, і завдяки цьому тиск у нафтопроводі зменшується. Використання газових ковпаків у різних технічних додатках розглядалося багатьма авторами [8-10], проте їх використанню для захисту магістральних нафто- та нафтопродуктопроводів присвячене відносно невелику кількість робіт. Насамперед, слід зазначити роботу Л.В.Полянської [11], в якій автор показав, що газові ковпаки уповільнюють швидкість збільшення тиску перед насосною станцією, що відключається, сприяючи тим самим виконанню захисних заходів, як, наприклад, своєчасне відключення станцій, що знаходиться вище за течією. У дослідженні стверджується, що система захисту нафтоналивного терміналу, заснована на використанні газового ковпака, є цілком ефективною і наводяться доказові оцінки цього твердження.

В роботі [12] виконано дослідження неусталених процесів у трубопроводах, обладнаних різними системами демпфування хвиль тиску, виявлено переважні галузі застосування тих чи інших

способів захисту. Визначено, що найбільш ефективним застосуванням газових ковпаків є захист щодо коротких трубопроводів, тоді як системи згладжування хвиль тиску слід встановлювати на магістральних трубопроводах.

Мета роботи полягає в теоретичному вивченні систем з демпфіруючими пристроями у вигляді газових акумуляторів, для з'ясування ефективності застосування як засобів захисту трубопроводу від аварійних ситуацій.

## 2. Функціональні особливості газових ковпаків

Принципова схема газового ковпака показана на рис. 1. При збільшенні тиску в нафтопроводі частина транспортованої нафти йде в ковпак, що стискає газ, і завдяки цьому тиск у нафтопроводі зменшується.



Рисунок 1 – Схема газового ковпака [12]

У корпусі газового ковпака 1 знаходиться пружний герметичний балон 2, заповнений інертним газом. Рідина з трубопроводу, що захищається, надходить у порожнину газового ковпака через вхідний патрубок 4, на якому встановлена сепараторна решітка. Кількість газу у пристрої та тиск у порожнині газового ковпака контролюється через заправний патрубок 3.

До безумовних позитивних сторін описаного пристрою можна віднести відсутність додаткових пристроїв, необхідних для зворотного закачування

рідини з газового ковпака до магістрального трубопроводу після гідравлічного удару – після зниження рівня тиску в трубопроводі, рідина під дією зворотного перепаду тиску самостійно перетікає у трубопровід. З цього також випливає, що газовий ковпак може бути використаний необмежену кількість разів поспіль без виникнення небезпеки переповнення скидної ємності. Проте є очевидні недоліки використання газових ковпаків. Наприклад, вимоги щодо влаштування та експлуатації газових ковпаків дещо ускладнені щодо існуючих вимог. Крім того, в даний час не існує повністю опрацьованого пристрою газового ковпака, готового для застосування на нафтоперекачувальних станціях.

### 3. Використанням газових ковпаків для захисту магістральних трубопроводів

В даний час для мінімізації часу обслуговування навантаження суден на морських нафтоналивних терміналах відбувається з високою продуктивністю. У ситуації, що склалася, при досить швидкій зупинці перекачування в трубопроводі виникає хвиля гідравлічного удару, яка з великою швидкістю поширюється від місця перекриття потоку вгору за течією. Амплітуда хвилі підвищення тиску при цьому обчислюється за відомою формулою Н.С.Жуковського

$$\Delta p = \rho \cdot c \cdot \Delta w, \quad (1)$$

де  $\Delta p$  – амплітуда стрибка тиску;  $\rho$  – густина транспортованої рідини,  $w$  – швидкість поширення хвиль тиску у трубопроводі;  $\Delta w$  – зміна швидкості рідини, що породило хвилю тиску. Хвиля тиску виникає навіть тоді, коли січна засувка закривається, хоч і не миттєво, але за неприпустимо короткий час. Ось чому для захисту нафтоналивних трубопроводів на причалах встановлюють системи захисту від гідравлічного удару (СЗГУ), засновані на використанні, головним чином, запобіжних клапанів. Запобіжні клапани здатні надійно захистити трубопровід від гідравлічного удару, однак, для розміщення пов'язаних з ними ємностей, в які вони перепускають частину рідини, що транспортується, необхідний вільний простір, а його на причалі мало. Крім того, необхідно встановлювати насос для зворотного відкачування рідини із скидної ємності у трубопровід.

При достатньому обсязі газової порожнини газовий ковпак так само, як і запобіжний клапан, хоча й меншою мірою, здатний зменшити амплітуду хвилі гідравлічного удару, проте головний його ефект полягає в іншому. Газовий ковпак зменшує швидкість збільшення тиску в трубопроводі і тим самим сприяє своєчасному відключенню насосів, що нагнітають рідину в трубопровід, інакше кажучи, запобігає можливій аварії. Крім того, газовий ковпак усуває необхідність зворотного відкачування рідини з скидної ємності у трубопровід. Принципове влаштування газового ковпака зображено на рис. 2.

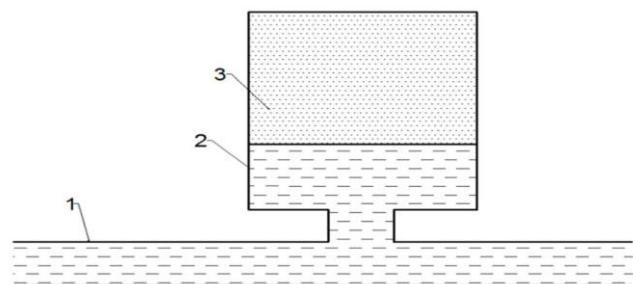


Рисунок 2 – Принципова схема роботи газового ковпака

При штатному режимі перекачування рідина, що транспортується, подається по трубопроводу 1, у цьому випадку тиск газу 3 у порожнині повітряного ковпака 2 встановлюється рівним тиском у перерізі підключення ковпака до трубопроводу. При підвищенні тиску в трубопроводі рідина буде частково скидатися в газовий ковпак, стискаючи інертний газ, що знаходиться в ньому. Для вибору параметрів системи захисту, заснованої на використанні газового ковпака, у кожному окремому випадку потрібні значні часові витрати, пов'язані з розрахунком перехідних процесів. Тому призначення даного дослідження полягає у спрощенні процесу вибору параметрів системи захисту трубопроводу від гідравлічного удару за допомогою результатів розрахунку, представлених у вигляді графіків безрозмірних залежностей та демонструючих вплив того чи іншого параметра на рівень зниження тиску в трубопроводі.

Для забезпечення максимальної ефективності результатів дослідження були визначені критерії подібності, які дозволяють представити отримані результати критеріальною функціональною залежністю. Такий підхід дозволяє при обмеженій кількості експериментів дати оцінку подальшого ходу

процесу та поведінки досліджуваної системи при поєднаннях безрозмірних параметрів. У системі, що розглядається, визначальними параметрами є параметри, що визначають величину прямого гідравлічного удару: початковий тиск  $p_n$  на ділянці трубопроводу; кінцевий тиск –  $p_k$ , який до того ж характеризує початковий тиск газу в ковпаку; швидкість  $w_0$  стаціонарного перекачування рідини, номінальна густина  $\rho$  рідини, що перекачується, і швидкість  $c$  поширення хвиль тиску по трубопроводу, а також протяжність  $L$  трубопроводу, його внутрішній діаметр  $d$  та початковий об'єм  $V_0$  газу в ковпаку. При цьому відсутність такого важливого параметра рідини, що перекачується, як динамічна в'язкість, пояснюється можливістю виразити його через інші відомі параметри. Параметром, що нормується, очевидно, є максимальний тиск перехідного процесу  $(p_{\max} - p_0) / \rho \cdot c \cdot w_0$ , що дозволяє визначити, чи зможе трубопровід витримати наслідки нестационарного процесу, що виникає внаслідок гідравлічного удару.

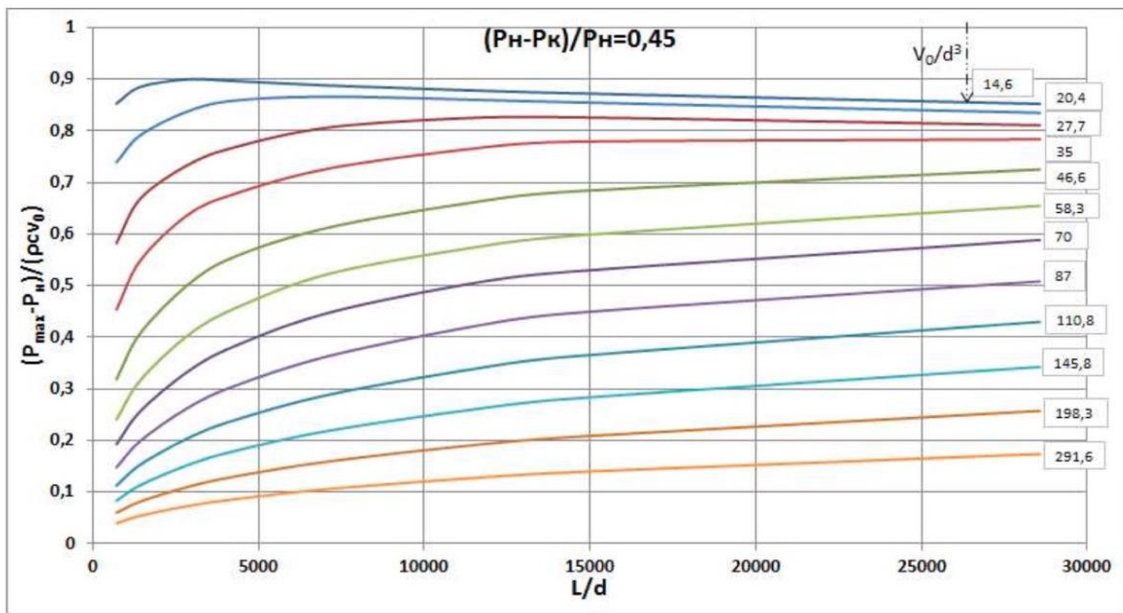
Відповідно до міркувань теорії розмірності, шукана залежність може бути записана як зв'язок між безрозмірним комплексом  $p_{\max}$ , який характеризує перевищення максимального тиску над початковим, і безрозмірними параметрами:

$$L/d, \quad V_0/d^3, \quad (p_n - p_k)p_n$$

Розрахунки, виконані за алгоритмом, наведеним в [12], представлені на графіку рис. 3. На кожному з цих рисунків наведено графіки залежності параметра:

$$(p_{\max} - p_0) / \rho \cdot c \cdot w_0, \quad (2)$$

Параметр характеризує рівень максимального підвищення тиску над початковим, від безрозмірної протяжності  $L/d$  трубопроводу на різних значеннях безрозмірного об'єму  $V_0/d^3$  газової порожнини ковпака та різних значень безрозмірного перепаду  $p_n/p_k$  в трубопроводі.



**Рисунок 3** – Графік залежності параметра  $(p_{\max} - p_0) / \rho \cdot c \cdot w_0$  від безрозмірного об'єму газової порожнини ковпака та різних значень безрозмірного перепаду  $p_n/p_k$  в трубопроводі  $p_n/p_k = 0,45$ .

Як ілюстрацію використання отриманих результатів розглянемо наступний приклад. Нехай потрібно вибрати об'єм газової порожнини ковпака для захисту трубопроводу нафтоналивного морського терміналу, що має протяжність  $L = 2500$  м та внутрішній діаметр  $d = 514$  мм, при перекачуванні дизельного палива із густиною  $\rho = 840$  кг/м<sup>3</sup> та витратою  $Q = 1100$  т/год. Початковий тиск

на виході із резервуарного парку  $p_n = 6,5 \cdot 10^5$  Па, тиск на прийомі танкера  $p_{\max} = 16 \cdot 10^5$  Па, несуча здатність трубопроводу  $p_k = 3,3 \cdot 10^5$  Па.

Для розрахунку всіх необхідних безрозмірних параметрів визначимо швидкість руху рідини трубопроводом:

$$w_0 = \frac{4Q/\rho}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 1100 \cdot 10^3 / 840}{3600 \cdot 3,14 \cdot 0,514^2} = 1,75 \text{ м/с.}$$

Розраховуємо безрозмірні параметри, що необхідні для визначення об'єму газового ковпака, прийнявши швидкість поширення хвилі тиску рівної  $c = 1000$  м/с. Маємо:

$$L/d = 2500/0,514 = 4864;$$

$$(p_{\max} - p_0)/\rho \cdot c \cdot w_0 = (16 - 6,5) \cdot 10^5 / (840 \cdot 10^3 \cdot 1,75) = 0,65;$$

$$(p_n - p_k) p_n = (6,5 - 3,3) 6,5 = 0,49.$$

Використовуючи криві, зображені на рис. 3, знаходимо значення шуканого безрозмірного параметра  $V_0/d^3 = 32$ . Звідси слідує що  $V_0 \approx 4,3$  м<sup>3</sup>. Таким чином, ковпак з об'ємом газової порожнини близько 4,3 м<sup>3</sup> здатний запобігти підвищенню тиску в трубопроводі вище 1,6 МПа.

#### 4. Висновки

Доведено ефективність застосування газових ковпаків для захисту магістральних трубопроводів від гідравлічного удару за умови забезпечення достатнього об'єму газового ковпака. Графіки безрозмірних залежностей параметрів газового ковпака дозволяють без проведення додаткових розрахунків оцінити об'єм порожнини газового ковпака для захисту трубопроводу від гідродудару. Зі збільшенням об'єму газової порожнини ковпака, середній рівень тиску в нафтоналивному трубопроводі зменшується.

Аналіз роботи газових ковпаків дозволив зробити висновок, що система захисту, яка використовує газові ковпаки з раціональним об'ємом, здатна ефективно захистити нафтоналивний трубопровід від неприпустимих перевантажень, що виникають при екстремому закритті засувки.

#### Особистий внесок авторів CRediT

**Бошкова І.Л.:** концептуалізація, методологія, формальний аналіз. **Волгушева Н.В.:** комп'ютерне моделювання, методичне забезпечення. **Тіглов О.С.:** аналіз та узагальнення даних. **Альтман Е.І.:** інформаційний пошук, експериментальні дослідження.

#### Література

1. Світлий Ю. Г., Білецький В. С. Гідравлічний

транспорт (монографія). – Донецьк: Східний видавничий дім, Донецьке відділення НТШ, «Редакція гірничої енциклопедії», 2009. – 436 с.

2. В.С. Костишин, І.І. Яремак. Аналіз показників ефективності та надійності роботи насосного агрегата на засадах системного підходу // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2017. – № 1(62) – С. 50-60.

3. Д.А. Міхайлов, А.І. Гольянов. Про розподіл напору насосних станцій, обладнаних насосними агрегатами з частотно-регульованим приводом // Транспорт та зберігання нафтопродуктів та вуглеводневої сировини. – 2011. – №1. – С.6-8.

4. В.М. Глоба, О.Т. Мартинюк. Основи будівництва трубопроводів: навч. посіб. – Івано-Франківськ: ІФДТУНГ, 2000. – 156 с.

5. Кріль С.О. Дослідження та моделювання комплексу поворотна заслінка-виконавчий механізм на магістральному трубопроводі // Методи та прилади контролю якості. – 2013. – №2. – С.84-88.

6. М.В. Лур'є, Н.С. Арбузов, С.М. Оксенгендлер. Розрахунок параметрів перекачування рідин із протитурбулентними присадками // Наука та технології трубопровідного транспорту нафти та нафтопродуктів. – 2012. – №2. – С.56-60.

7. Т.К. Алдияров, А.Г. Дідух та ін. Дослідження ефективності протитурбулентної присадки при трубопровідному транспорті нафти по маршруту, що експортується Казахстан – Китай // Наука та технології трубопровідного транспорту нафти та нафтопродуктів. – 2014. – №2 (14). – С.22-28.

8. А.Ф. Бархатов, П.Е. Настєпанін. Протитурбулентна присадка як один із способів зниження капітальних та експлуатаційних витрат // Наука та технології трубопровідного транспорту нафти та нафтопродуктів. – 2014. – №3(15). – С.18-26.

9. Л.Д. Ландау, Е.М. Ліфшиць. Гідродинаміка. 3-тє вид. – М.: Наука, 1986. – 736 с.

10. Н.С. Арбузов, В.А. Поляков. Гідродударні явища та комплексний захист морських нафтоналивних терміналів // Вісті вузів. Нафта і газ. – 2011. – №2. – С. 50-53.

11. D. Bernoulli. Hydrodynamica. – Johann Reinhold Dulsecker, 1738. – 325 p.

12. Федосєєв М. Н. Динаміка хвильових процесів у магістральних трубопроводах із системами захисту від перевантажень за тиском на основі газових акумуляторів: Канд. дис. – М., 2018. – 126 с.

# Analysis of the feasibility of using gas accumulators for the oil pipelines protection from water hammer

Iryna Boshkova<sup>1</sup>✉, Natalya Volgusheva<sup>2</sup>, Oleksandr Titlov<sup>3</sup>, Ella Altman<sup>4</sup>

<sup>1-4</sup>Odessa National University of Technology, 112 Kanatnaya Str., Odessa, 65039, Ukraine

✉ e-mail: <sup>1</sup>boshkova.irina@gmail.com

ORCID: <sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0001-5989-9223>; <sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0002-9984-6502>;

<sup>3</sup><https://orcid.org/0000-0003-1908-5713>; <sup>4</sup><https://orcid.org/0000-0002-8934-2036>

*The expediency of using gas caps to prevent emergency situations caused by waves of increased pressure that occur in the pipeline when the pumping rate in main oil pipelines changes is investigated. It was determined that the most effective application of gas caps is the protection of short pipelines, while pressure wave smoothing systems should be installed on main pipelines. An analysis of systems with damping devices in the form of gas accumulators was carried out to find out the effectiveness of their use as a means of protecting the pipeline from emergency situations. The positive aspects of the use of gas caps are identified, which include the absence of additional devices necessary for the return injection of liquid from the gas cap to the main pipeline after a water hammer. With a sufficient volume of the gas cavity, the gas cap, as well as the safety valve, although to a lesser extent, is able to reduce the amplitude of the hydraulic shock wave, but its main effect is worsened in another way. The gas cap reduces the rate of increase in pressure in the pipeline and thus worsens the shutdown of the pumps pumping liquid into the pipeline, in other words, prevents a possible accident. However, there is currently no fully developed gas cap device ready for use at oil pumping stations. With a sufficient volume of the gas cavity, the gas cap, as well as the safety valve, although to a lesser extent, is able to reduce the amplitude of the hydraulic shock wave, but its main effect is worsened in another way. To ensure the maximum efficiency of the research results, similarity criteria were defined, which allow to present the obtained results as a criterion functional dependence. This approach allows, with a limited number of experiments, to estimate the further course of the process and the behavior of the system under study with various combinations of dimensionless parameters. A calculated example of the use of the obtained results is given, which demonstrates the choice of the volume of the gas cavity of the cap for the protection of the oil pipeline.*

**Keywords:** Pipeline protection; Efficiency; Schematic diagram; Defining parameters; Cap gas cavity volume

## References

1. Svitlyi, Yu. H., Biletskyi, V. S. (2009) Hydraulic transport (monograph). Donetsk: Eastern Publishing House, Donetsk branch of the NTSh, "Editorial of the mining encyclopedia", 436.
2. Kostyshyn, V.S., Yaremak, I.I. (2017) Analysis of indicators of efficiency and reliability of the pumping unit based on the principles of the system approach. *Exploration and development of oil and gas fields*, 1(62), 50-60.
3. Mikhailov, D.A., Golyanov, A.I. (2011) On the distribution of the pressure of pumping stations equipped with pump units with a frequency-regulated drive. *Transport and storage of petroleum products and hydrocarbon raw materials*, 1, 6-8.
4. Globa, V.M., Martyniuk, O.T. (2000) Fundamentals of pipeline construction: teaching manual. *Ivano-Frankivsk: IFDTUNG*, 156.
5. Kryl, S.O. (2013) Research and modeling of the complex rotary valve-executive mechanism on the main oil pipeline. *Methods and devices of quality control*, 2, 84-88.
6. Lurie, M.V., Arbuzov, N.S., Oksengendler, S.M. (2012) Calculation of parameters for pumping liquids with anti-turbulence additives. *Science and technology of pipeline transport of oil and petroleum products*, 2, 56-60.
7. Aldiyarov, T.K., Didukh, A.G. et al. (2014) Study of the effectiveness of anti-turbulence additive during pipeline transport of oil along the route exported from Kazakhstan to China. *Science and technology of pipeline transport of oil and petroleum products*, 2 (14), 22-28.
8. Barkhatov, A.F., Nestepanin, P.E. (2014) Anti-turbulence additive as one of the ways to reduce capi-

tal and operating costs. *Science and technology of pipeline transport of oil and petroleum products*, 3(15), 18-26.

9. **Landau, L.D., Lifshits, E.M.** (1986) Hydrodynamics. 3rd edition. *M.: Nauka*, 736.

10. **Arbuzov, N.S., Polyakov, V.A.** (2011) Water hammer phenomena and comprehensive protection of marine oil terminals. *News of universities. Oil and gas*, 2, 50-53.

11. **Bernoulli, D.** (1738) Hydrodynamica. *Johann Reinhold Dulsecker*, 325.

12. **Fedoseev, M.N.** (2018) Dynamics of wave processes in main pipelines with pressure overload protection systems based on gas accumulators. *Cand. thesis*, 126.

---

Received 18 October 2022

Approved 07 December 2022

Available in Internet 30 December 2022