УДК 621.867

БЕРМАН В. П., д-р техн. наук, провідний науковий співробітник Інститут гідромеханіки Національної академії наук України, м.Київ ГУСЄВ А. М., канд. біол. наук, доцент Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського», м. Київ

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПИТАНЬ ЕНЕРГОСБЕРЕЖЕНІЯ ТА БЕЗПЕКИ РОБОТИ СИСТЕМ ГІДРАВЛІЧНОГО ТРУБОПРОВІДНОГО ТРАНСПОРТУ СУСПЕНЗІЙ

Анотація. У даній статті обговорюються основи теоретичного і чисельного моделювання нестаціонарного турбулентного перенесення широкого класу твердих дисперсних матеріалів в різних гідравлічних системах трубопровідного транспорту.

**Ключові слова:** трубопровідний гідравлічний транспорт, нестаціонарні потоки, суспензія, дисперсний матеріал, чисельне моделювання.

**Abstract.** The theoretical approachand numerical modeling for nonsteady turbulent transport of wideclass of solid dispersion material in different hydraulic pipeline systems are discussed in thispaper.

**Keywords:** hydraulic pipeline transport, non-steady flows, slurry, dispersion material, numerical modeling.

Вступ. Згідно із загальноприйнятим підходом, як першочергове завдання в галузі трубопровідного гідротранспорту твердих дисперсних матеріалів, слід розглядати вивчення сталих режимів транспортування. Саме тому, основна увага в літературі приділено розгляду подібного роду питань. Разом з тим, не менший інтерес для практики представляє також розробка гідродинамічних методів розрахунку і для випадку нестаціонарного руху в трубах різного роду суспензій. Важливість розглянутих завдань обумовлена, перш за все, високими вимогами до надійності (безпеки) трубопровідних гідросистем, особливо для систем зі складною структурою.

З досвіду експлуатації такого роду систем відомо, що в процесі роботи можливі постійні зміни умов транспортування, а це, в свою чергу, може викликати різкі і часто небезпечні коливання тиску і витрат. У зв'язку з цим вже на стадії проектування необхідні зручні методи розрахунку несталого руху, що дозволяють визначити можливі коливання тиску і витрати при різних режимах експлуатації трубопровідних систем. На основі цих методів можна отримати необхідні дані для розрахунку і вибору системи захисту трубопроводів від надмірно високого тиску, а також для розрахунку і налагодження систем автоматичного управління і захисту.

## 1. Розробка чисельних алгоритмів розрахунку нестаціонарного руху суспензій в трубах

Як вже зазначалося вище, при роботі промислових і, особливо, складних гідротранспортних систем практично постійно можуть мати місце різкі коливання тиску, що іноді призводить до небажаних аварійних ситуацій. Подібного роду перехідні (нестаціонарні) режими роботи виникають при пусках і зупинках подачі суміші або несучої середи, під час заповнення або спорожнення системи, а також при різких змінах швидкості або концентрації суміші, яка транспортується. Повний облік нестаціонарності дозволить забезпечити стійку і енергозберігаючу роботу всієї транспортної системи, підвищить надійність роботи, довговічність і безпеку напірних трубопроводів і всього гідромеханічного обладнання.

На цей час відома незначна кількість робіт, що відносяться до вирішення деяких з сформульованих вище завдань нестаціонарного руху дисперсних сумішей в трубах. Пропоновані в цих роботах підходи, як правило, містять ряд припущень, що в окремих випадках може вплинути як на характер, так і на величини, які визначають гідродинамічні параметри [1].

У найзагальнішому вигляді задача нестаціонарного руху стискає мого гетерогенного середовища для випадку, наприклад, одновимірного та ізотермічного наближення повинна вирішуватися на основі отриманої в [2, 3] загальної системи рівнянь. Для повного замикання до даної системи необхідно додати також відповідні початкові і граничні умови.

У даній роботі для простоти і зручності інженерних розрахунків обговорюється один із спрощених методів моделювання подібного роду потоків. При цьому зроблено спробу запропонувати універсальний метод розрахунку, який одночасно може бути використаний як для гідро-, так і пневмотранспотних нестаціонарних потоків.

Так для визначеності, спільне завдання нестаціонарного руху, наприклад, гідросуміші, яка сформульована в рамках одновимір-

ної задачі, є окремим випадком системи рівнянь, викладеної в роботі [2, 3], і зводиться до вирішення системи двох рівнянь в частинних похідних:

$$\frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + \frac{\partial(P)}{\partial x} + \rho \lambda^* \frac{V|V|}{2D} = 0;$$

$$\frac{\partial(P)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V)}{\partial x} = 0,$$
(1)

де V — швидкість руху гідросуміші, P — тиск в системі,  $\rho$  — щільність гідросуміші, a — швидкість поширення звуку,  $\lambda^*$  — коефіцієнт гідравлічних опорів, D — діаметр трубопроводу.

Ясно, що ще в більш спрощеному варіанті система (1) при заміні відповідних вихідних параметрів ( $\rho$ ,  $\lambda^*$  та *a*) на постійні величини, рівняння (1) переходить в систему, що описує нестаціонарний рух однорідної рідини.

Як і більш загальна система рівнянь руху суспензії [3], так і спрощена система рівнянь (1) відноситься до гіперболічного типу і при їх вирішенні можуть бути використані одні й ті ж аналітичні або чисельні методи. Надалі, не порушуючи спільності міркувань, виключно з точки зору простоти викладу самого алгоритму розрахунку, за основу приймемо систему спрощених рівнянь (1).

Отже, задаючи початкові і граничні умови (знаючи при цьому закон зміни  $\rho$ ,  $\lambda^*$ , і *a*), система рівнянь (1) може бути, в принципі, вирішена для різних режимів роботи напірних гідротранспортних систем.

Разом з тим, слід зазначити, що коректне завдання граничних умов і вибір зручного способу розв'язання системи (1) найчастіше пов'язане з певними труднощами. Зупинимося детальніше на методі вирішення цієї системи рівнянь.

У літературі відомі як аналітичні, так і чисельні методи вирішення систем рівнянь гіперболічного типу. При використанні аналітичних методів рішення, через нелінійність системи (1), передбачається попередньо виконати лінеаризацію вихідних рівнянь. Більшість авторів, стосовно подібного роду завдань, проводили лінеаризацію системи (1) шляхом заміни члена  $\frac{\lambda^* |V|}{2D}$  на його постійну величину, яка дорівнює середньому значенню за координатою і часом. Крім того, при вирішенні конкретних завдань приймається  $\rho = \text{const}$ , що виключає можливість фазових переходів. За-

значені вище допущення призводять до того, що не завжди вдається домогтися задовільної відповідності між розрахунковими і експериментальними даними.

У зв'язку з цим виникає необхідність розробки універсального методу вирішення системи (1). Цілком очевидно, що в такій ситуації можливо використовувати лише чисельні методи розрахунку.

Після аналізу різних чисельних алгоритмів за основу були прийняті явні різницеві схеми Лакса і Лакса-Вендроффа, які добре зарекомендували себе в області гідро- і газодинаміки. У такій постановці вихідну систему рівнянь (1) можна вирішити з урахуванням змінного значення параметрів  $\rho$ ,  $\lambda^*$ , і *а*. Ще раз відзначимо, що система рівнянь (1), загалом кажучи, моделює рух суміші в рамках одновимірної задачі. Однак, використання чисельних методів рішення, дозволило нам до низки певних задач на кожному розрахунковому кроці за координатою і часом проводити перерахунок параметрів  $\rho$ ,  $\lambda^*$ , і *а* з умови стаціонарного руху суспензії несучого потоку. Такий підхід безумовно, має новизну і впровадження.

На базі запропонованої схеми нами були проведені чиселенні розрахунки нестаціонарного руху однорідної рідини і гідросуміші. Зокрема, розглядалися завдання запуску і зупинки трубопровідних систем, завантаження трубопроводу твердим дисперсним матеріалом. Крім того, проводилося порівняння з відомими експериментальними даними. Всі ці розрахунки і порівняння показали достатньо високу надійність запропонованого методу розрахунку.

Розглянемо як приклад, реалізацію пропонованого алгоритму для випадку раптової або планової зупинки трубопровідної гідротранспортної системи. В цьому випадку при раптовій зупинці швидкість суміші поблизу засувки покладається рівною нулю, а при плановому відключенні — швидкість задається згідно із законом закриття засувки. Тиск же поблизу засувки перераховується як гранична умова відповідно до системи рівнянь (1).

## 2. Дослідження перехідних процесів при планових і аварійних зупинках трубопровідних гідротранспортних систем. Розрахунок гідравлічного удару при раптовому і плановому закритті засувки

Прийнявши за основу систему рівнянь (1), чисельна реалізація методу розрахунку може проводитися за такою схемою.

За заданими вихідними параметрами (діаметр трубопроводу, характеристики твердого матеріалу і середня об'ємна концентрація гідросуміші) визначають середню швидкість потоку, при якій всі тверді частинки, що знаходяться в потоці, повністю і стабільно транспортуються по трубопроводу. Ця величина, як відомо, в літературі має сенс критичної швидкості (*Vk*). Для визначення *Vk* в роботі використовувалася універсальна методика, яка була розроблена в Інституті гідромеханіки НАНУ (м. Київ). Основи цієї методики досить детально викладено в роботах [4, 5]. Далі припускається, що якщо при заданому розрахунковому кроці за координатою і часом величина V > Vk, то коефіцієнт гідравлічних опорів на цьому кроці обчислюється відповідно до запропонованої в [4, 5] формули для гідросуміші з щільністю . Коли має місце докритичний режим течії (V < Vk), то рух гідросуміші замінюється рухом рідини в освітленій від осаду області. Для цих умов коефіцієнт гідравлічних опорів  $\lambda^*$  визначається через гідравлічний радіус освітленої області. При цьому для таких режимів враховувався час осідання частинок різної крупності на нижню стінку трубопроводу.

На основі запропонованої схеми було розглянуто ряд задач нестаціонарного руху одно- і двофазних сумішей.

На рис. 1, як приклад, наведена характерна залежність ударного тиску поблизу засувки при русі двох типів гідросумішей — водопіщаної суспензії і суспензії залізорудного концентрату. Принциповим в цих розрахунках є різні щільності гідросумішей і довжина транспортного трубопроводу.



*Рис. 1.* Залежність тиску від часу при миттєвому (гідравлічний удар) і поступовому закритті засувки D = 0,5 м:

*a*) гідротранспорт водо піщаної суміші, довжина трубопроводу L = 500 м: 1 — миттєве закриття; 2 —  $T_3 = 20$  сек; 3 —  $T_3 = 100$  сек; *b*) гідротранспорт суспензії залізорудного концентрату, довжина трубопроводу L = 500 м: 1 — миттєве закриття, 2 —  $T_3 = 10$  сек; 3 —  $T_3 = 100$  сек Як видно з цього рисунка, загальний характер зміни ударного тиску в сумішах подібний до аналогічного процесу в однорідної рідині. Істотна відмінність полягає, в основному, в величині і швидкості затухання гідравлічного удару.

При цьому, як видно з рис. 1, величина і швидкість зміни ударного тиску істотно залежить від щільності матеріалу, що транспортується.

При цьому, як видно з рис. 1, величина і швидкість зміни ударного тиску істотно залежить від щільності матеріалу, що транспортується.

Розглянутий простий приклад розрахунку дозволяє судити про те, як на основі рішення системи (1) можна розрахувати і управляти перехідними процесами в системах трубопровідного гідротранспорту. Іншими словами, на основі подібних розрахунків можна заздалегідь прогнозувати оптимальну (енергозберігаючу) і безаварійну (безпечну) роботу всієї гідротранспортної системи і відповідного регулюючого обладнання.

Висновки. У роботі обговорюється метод теоретичного і чисельного моделювання нестаціонарного турбулентного перенесення твердих дисперсних матеріалів в трубах. Загальна система усереднених диференціальних рівнянь і метод замикання цих рівнянь також є предметом досліджень даної роботи. Представлен тестовий приклад розрахунку двох типів суспензій в трубопроводі заданого діаметра і довжини. Пропонований алгоритм розрахунків може бути використаний для проектування конкретних систем гідравлічного трубопровдного транспорту суспензій.

## Література

1. E. Bournaskiand, V. Berman, Waters Problems, Vol. 28, Bulgaria, Sofia, 1996. – P. 59–66.

2. Берман В. П., Бобоев Л. Г. Расчет переходных процессов в системах трубопровідного транспорта твердых дисперсних материалов. Материалы международной научно-практической конференции на тему: «Внедрение наукоёмкой техники итехнологийв производстве». Технологический университет Таджикистана, часть 2, изд. «Ирфон», г. Душанбе 2013. — С. 12—17.

3. S. Kril and V. Berman, Equations of Turbulent Gas/Solids Flow, International Journal of Fluid Mechanics Research, Vol.27, No1, 2000. – P. 43–55. 4. S. Kril, Suspension Conveying Pressure Flows, Naukova Dumka, Publishing House, Kiev, 1990, 159 pages.

5. S. Kril and V. Berman, Numerical Simulation of Flows of Suspensions of Matter in Gas in Pipes under High Pressure, International Journal of Fluid Mechanics Research, Vol. 23, Nos. 1&2, 1996. – P. 22–29.

## *Інформація про авторів: Гусєв Аркадій Миколайович* E-mail: yk-81@i.ua