

С.І. КРІЛЬ, доктор технічних наук
І.В. СКОРОХОД, кандидат фізико-математичних наук
В.В. ФАДЕІЧЕВ, головний інженер-гідротехнік
Інститут гідромеханіки НАН України

ЕНЕРГЕТИЧНА МОДЕЛЬ ЕРЛІФТА

Запропоновано новий підхід до вивчення загальних закономірностей висхідної течії суміші рідини і повітряних бульбашок у вертикальній трубі, в основу якого покладено гідравлічні рівняння нерозривності і енергобаланса для стаціонарного двофазного ізотермічного потоку. Побудовано енергетичну модель ерліфтних газорідинних течій з урахуванням втрат напора на тертя і ковзання фаз. Наведено результати порівняння розрахункових витратних характеристик ерліфтів з експериментальними.

Ключові слова: ерліфт, газорідинна течія, енергетична модель, втрати напора на тертя і ковзання фаз, витратна характеристика ерліфта.

Предложен новый подход к изучению общих закономерностей восходящего течения смеси жидкости и воздушных пузырей в вертикальной трубе, в основу которого положены гидравлические уравнения неразрывности и энергобаланса для стационарного двухфазного изотермического потока. Построена энергетическая модель эрлифтных газожидкостных течений с учетом потерь напора на трение и скольжение фаз. Приведены результаты сравнения расчетных расходных характеристик эрлифтов с экспериментальными.

Ключевые слова: эрлифт, газожидкостное течение, энергетическая модель, потери напора на трение и скольжение фаз, расходная характеристика эрлифта.

The new method of approach to the study of the general regularities of the upward flow of the mixture liquid and air bubbles in vertical pipe has been suggested in this paper. The hydraulic continuity equations and equations of energy balance for stationary isothermal two-phase flow were used as a base of this method. The energy model of airlift for gas-liquid flows, taking into account the pressure losses due to friction and slip phase. The results of a comparison of the calculated flow characteristics of the airlift with the experimental ones are given.

Keywords: airlift, gas – liquid flow, energy models, pressure losses due to frictions and slip phase, flow rate characteristics of airlift.

Висхідний рух сумішей рідини і повітряних бульбашок у вертикальній піднімальній трубі ерліфтів носить складний характер. Такі потоки турбулентні і нерівномірні. Внаслідок пониження тиску уздовж потоку змінюються у тому ж напрямку не тільки об'єм і густина газової фази, а й структура і режим руху суміші та її гідравлічні характеристики. Із-за неперервного спливання бульбашок потік газорідинної гетерогенної суміші характеризується, як правило, ковзанням фаз, на що потрібно звернути особливу увагу при побудові математичної моделі такого роду двофазних потоків. Адже при обтіканні спливаючих бульбашок рідиною за їх кормою появлятимуться вихорові сліди або дрібномасштабні збурення, на утворення яких витратиметься потужність сили гідродинамічної взаємодії рідинної і газової фаз у відносному осередненому русі цих фаз. При цьому потужність цієї сили буде дорівнювати дисипативній потужності внутрішніх сил в'язкого тертя в області вихрової течії і, таким чином, виражатиме втрату частини механічної енергії газорідинного потоку на ковзання фаз.

Відомі у науковій літературі математичні моделі ерліфтних газорідинних течій будуються на основі диференціальних рівнянь збереження маси і імпульсу для одновимірного стаціонарного руху сумішей [1-5]. Однак, такі моделі не враховують потужність сили міжфазної взаємодії у відносному русі фаз, оскільки ця сила не міститься в рівнянні руху газорідинної суміші у цілому. Саме з цим, можливо, і пов'язані відомі труднощі при визначенні гідравлічного коефіцієнта тертя у вертикальних газорідинних потоках.

Нами запропоновано новий так званий енергетичний підхід до побудови математичної моделі ерліфтних газорідинних течій. В основу його покладено базові гідравлічні рівняння нерозривності фаз, рівняння енергобалансу для потоку газорідинної суміші в трубі (рівняння Бернуллі) та рівняння термодинамічного стану фаз.

Для стаціонарного ізотермічного руху реальної (в'язкої) газорідинної суміші у вертикальній піднімальній трубі ерліфта зазначені рівняння напишемо, враховуючи [6,10], у наступному вигляді:

рівняння нерозривності фаз:

$$\rho_r Q_r = const, \quad (1)$$

$$Q_w = const; \quad (2)$$

рівняння Бернуллі у формі напорів:

$$(1 - C_m) \frac{P_1 - P_2}{\rho_w g} + C_m \frac{P_{am}}{\rho_0 g} \ln \frac{P_1}{P_2} = H + \frac{1}{2g} [(1 - C_m)(u_{w,2}^2 - u_{w,1}^2) + C_m(u_{r,2}^2 - u_{r,1}^2)] + h_{тр} + h_{к}; \quad (3)$$

$$h_{\text{тп}} = \frac{4}{D} \int_0^H \frac{\tau_0}{\rho_P g} dz; \quad (4)$$

$$h_k = \frac{F}{g(Q_{m,r} + Q_{m,w})} \int_0^H R(u_r - u_w) dz; \quad (5)$$

рівняння стану газової і рідинної фаз при абсолютній температурі

$$T = \text{const.}$$

$$\frac{P}{\rho_r} = \text{const.}; \quad (6)$$

$$\rho_w = \text{const.} \quad (7)$$

При написанні рівнянь (1) – (7) використані наступні позначення:

ρ_r, ρ_w – густина газової і рідинної фаз; ρ_0 – густина вільного повітря при нормальних (технічних) умовах; Q_r, Q_w – об'ємна витрата газу і рідини; C_m – витратна масова концентрація газової фази; P – робочий абсолютний тиск у піднімальній трубі ерліфта; $P_{\text{атм}}$ – атмосферний тиск при нормальних (технічних) умовах; u_w, u_r – середня у живому перерізі потоку істинна швидкість рідинної і газової фаз; $h_{\text{тп}}, h_k$ – втрата п'єзометричного напору на тертя і ковзання фаз по довжині піднімальної труби ерліфта; τ_0 – інтенсивність сили тертя на стінках труби; ρ_P – витратна густина газорідинної суміші; F, D, H – площа перерізу, діаметр і довжина піднімальної труби ерліфта; $Q_{m,w}, Q_{m,r}$ – масова витрата рідинної і газової фаз; R – питома, віднесена до одиниці об'єму суміші, сила міжфазової гідродинамічної взаємодії, обумовлена ковзанням фаз; Z – координата, спрямована вверх, відлік якої починається від центра змішуючого пристрою ерліфта; g – прискорення вільного падіння; індексами 1 і 2 позначені величини у початковому і кінцевому живих перерізах газорідинного потоку у піднімальній трубі ерліфта.

Рівняння (1) – (7) є базовими рівняннями для побудови енергетичної математичної моделі ерліфтних течій, неперервною фазою яких являється рідина, а дискретною – бульбашки (снаряди) повітря.

Основна задача гідравлічного розрахунку ерліфтною установки полягає у визначенні її продуктивності, тобто об'ємної витрати рідини у піднімальній вертикальній трубі ерліфта залежно від подачі вільного повітря при нормальних (технічних) умовах Q_0 та геометричних параметрів установки.

Для побудови витратної характеристики ерліфта $Q_0 - Q_w$ на основі рівнянь (1) – (7) враховано лінійний характер зміни тиску уздовж потоку і попередньо вирішено низку важливих питань теорії ерліфта, пов'язаних з визначенням істинної концентрації повітря у довільному живому перерізі висхідного газорідинного потоку [11], істинних швидкостей фаз [10],

інтенсивності сили тертя газорідної суміші до стінок труби [12], а також втрат напору на тертя і ковзання фаз та робочого тиску у змішувачі P_1 .

В результаті вирішення вищезазначених питань, рівняння (3) перетворюється до рівняння витратної характеристики ерліфта, яке пов'язує величини Q_w , Q_0 , P_1 , а також гідравлічний коефіцієнт тертя, газоміст та геометричні характеристики конструктивних елементів ерліфтною установки.

В даній роботі розроблено методику гідравлічного розрахунку ерліфта з пробковою структурою водовітряної суміші. Саме для таких ерліфтів визначено гідравлічний коефіцієнт тертя λ на основі одержаного рівняння витратної характеристики з використанням відомих експериментальних витратних характеристик [7,8,13,14,15]. В результаті виявлено, зокрема, автомодельну область гідравлічного опору, в якій $\lambda = 0,05$.

На рис. 1–6 наведені експериментальні витратні характеристики, запозичені із [9], а також розрахункові, одержані за методикою [9], розробленою на основі рівняння імпульса для газорідного потоку, та, крім цього, за нашою методикою, розробленою на основі енергетичної моделі. На цих рисунках видно, що розрахункові витратні характеристики ерліфта, одержані нами, цілком задовільно узгоджуються з відповідними експериментальними та розрахунковими характеристиками, наведеними в[9].

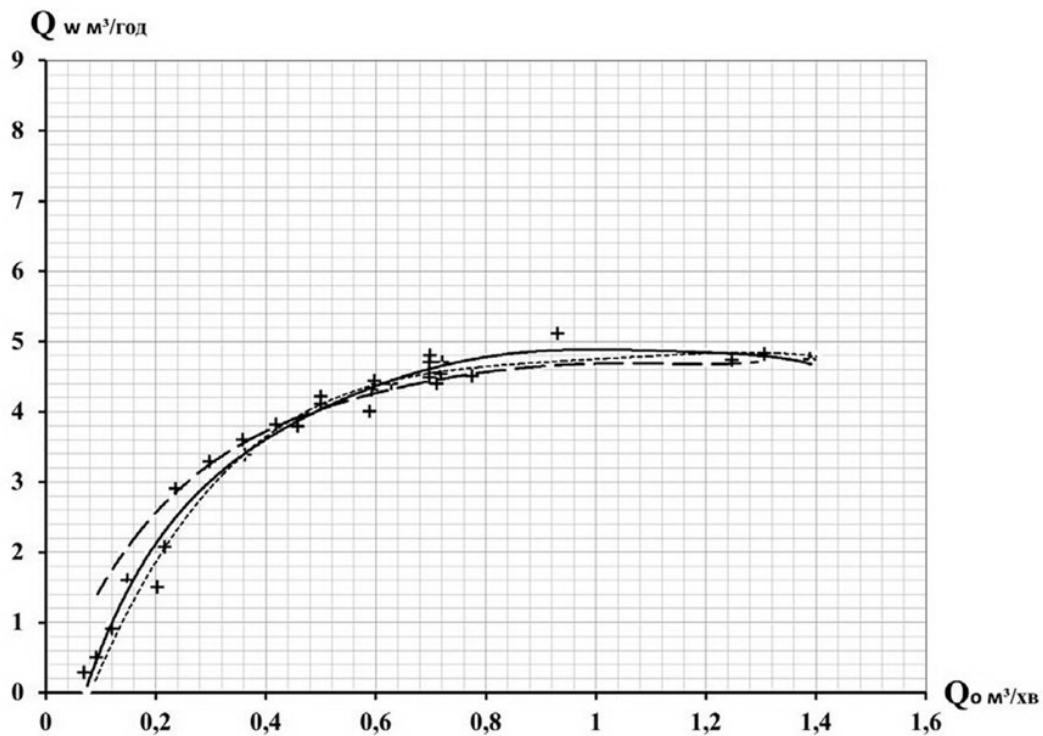


Рис. 1. Витратна характеристика ерліфта $D = 0,05$ м, $H = 14$ м,

$h = 5,5$ м, $d_{\pi} = 0,04$ м, $L_{\pi} = 1,615$ м: +, — — експеримент [8];

----- — розрахунок за методикою [9], — розрахунок за методикою ІГМ НАНУ

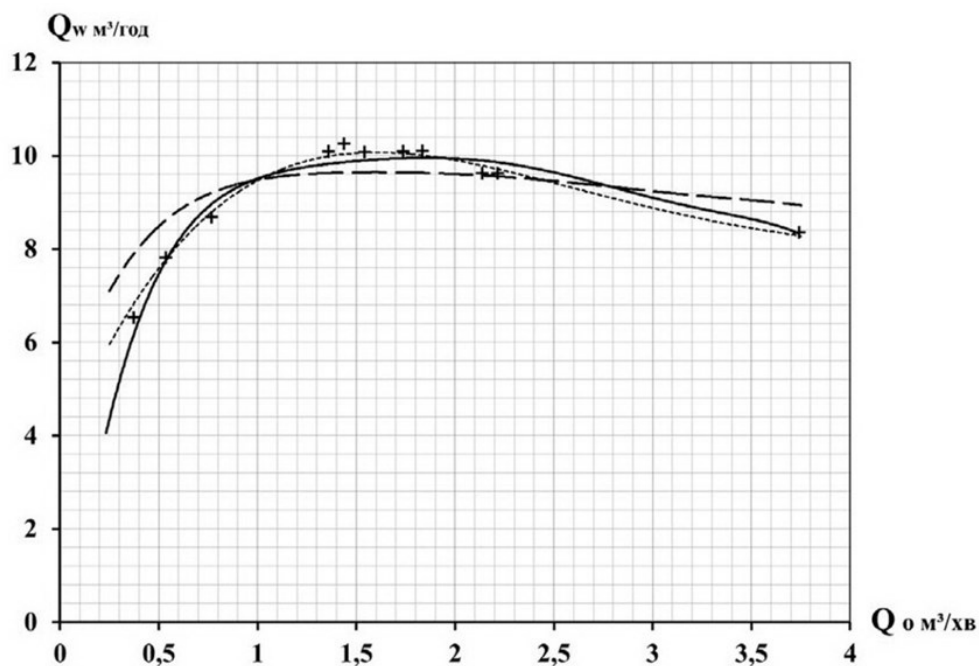


Рис. 2. Витратна характеристика ерліфта $D = 0,06$ м, $H = 16$ м, $h = 8$ м, $d_n = 0,05$ м, $L_n = 2,49$ м: +, ———— — експеримент [13]; ———— — розрахунок за методикою [9], — розрахунок за методикою ІГМ НАНУ

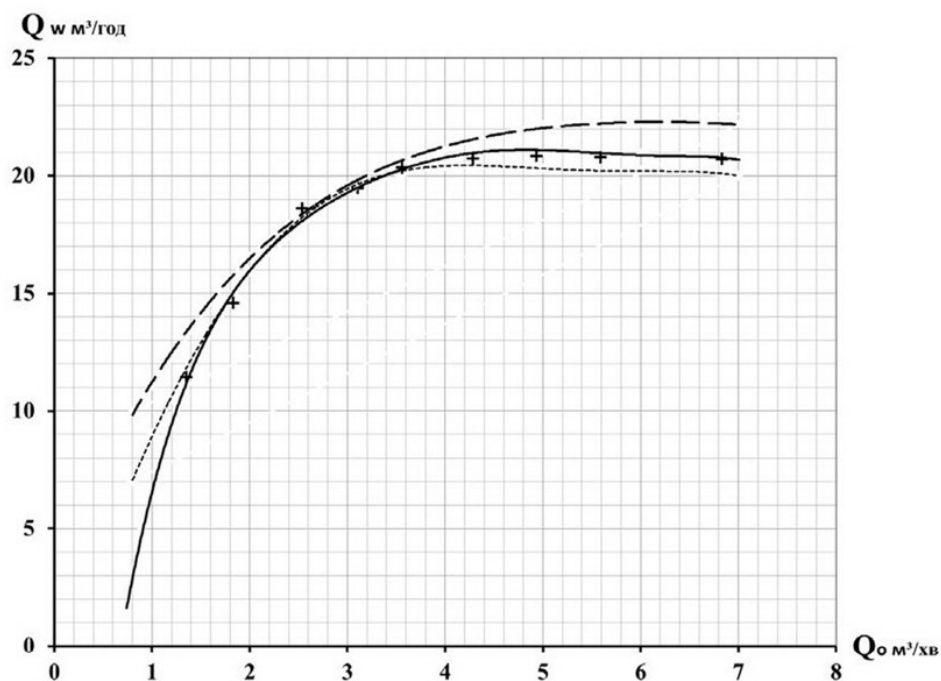


Рис. 3. Витратна характеристика ерліфта $D = 0,1$ м, $H = 16,9$ м, $h = 5,9$ м, $d_n = 0,07$ м, $L_n = 1,5$ м: +, ———— — експеримент [14]; ———— — розрахунок за методикою [9], — розрахунок за методикою ІГМ НАНУ

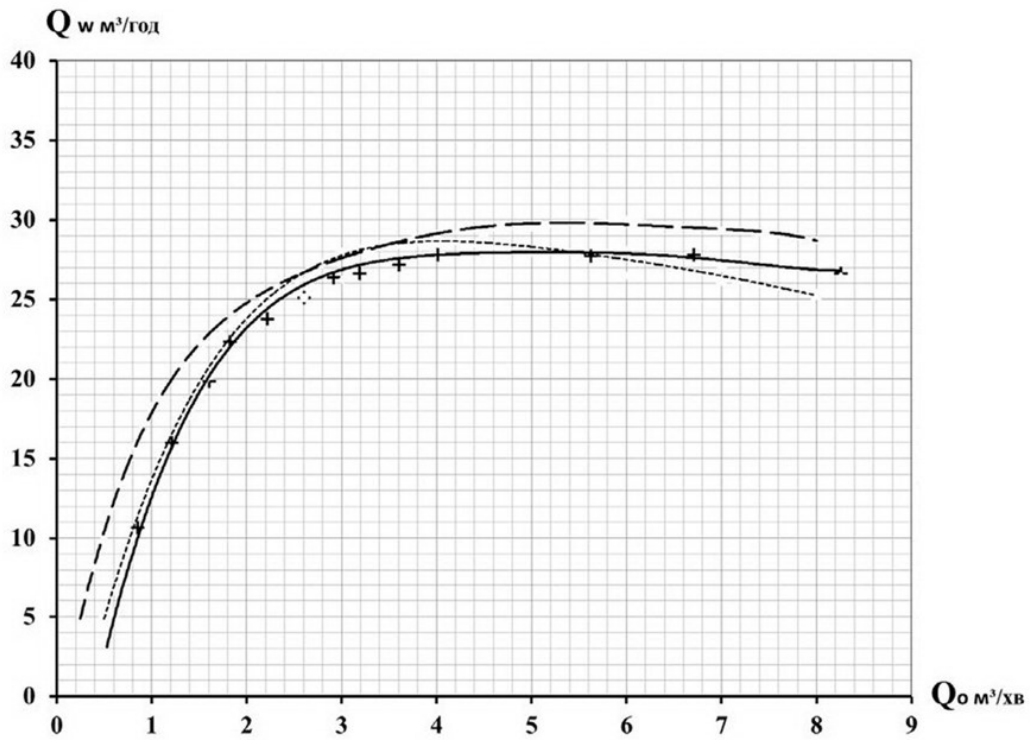


Рис. 4. Витратна характеристика ерліфта $D = 0,1$ м, $H = 16,9$ м, $h = 7,5$ м, $d_n = 0,07$ м, $L_n = 3,5$ м: +, — — — — — експеримент [14]; — — — — — розрахунок за методикою [9], — розрахунок за методикою ІГМ НАНУ

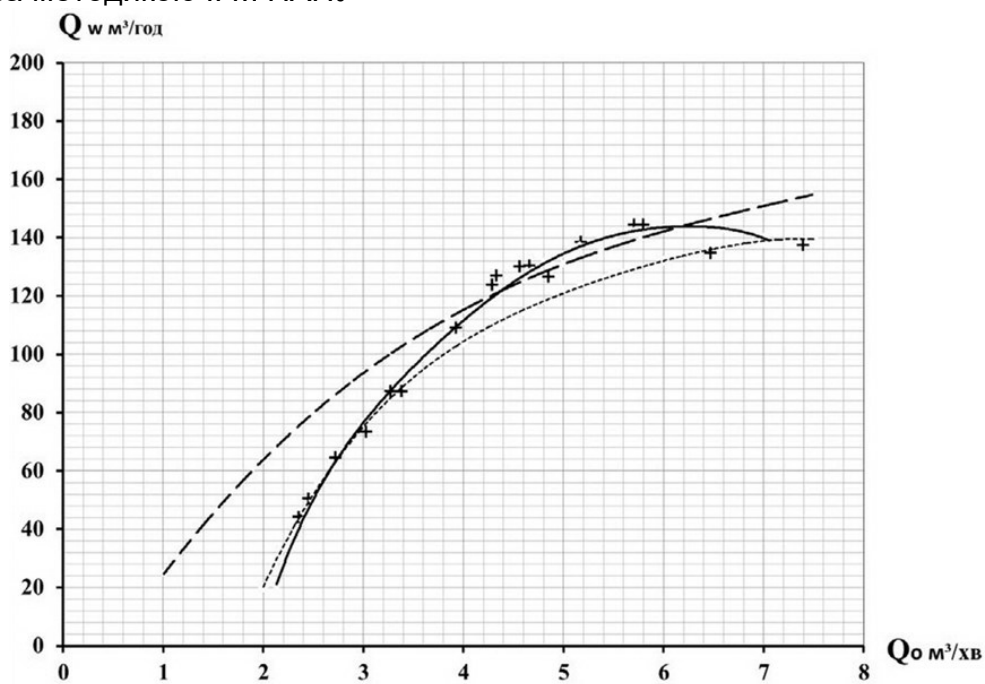


Рис. 5. Витратна характеристика ерліфта $D = 0,15$ м, $H = 51,4$ м, $h = 47$ м, $d_n = 0,15$ м, $L_n = 21$ м: +, — — — — — експеримент [7]; — — — — — розрахунок за методикою [9], — розрахунок за методикою ІГМ НАНУ

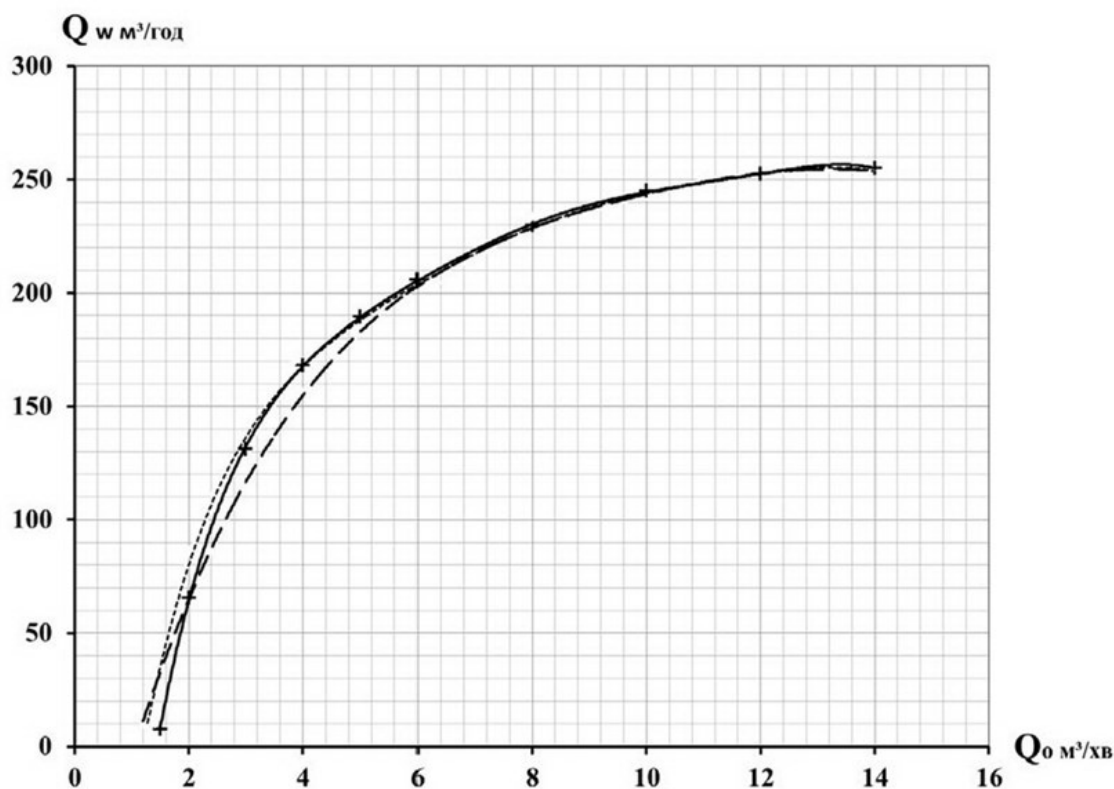


Рис. 6. Витратна характеристика ерліфта $D = 0,25$ м, $H = 11,45$ м, $h = 8$ м, $d_{\pi} = 0,15$ м, $L_{\pi} = 1,07$ м: +, — — — — експеримент [15];
 - - - - - розрахунок за методикою [9], — розрахунок за методикою ІГМ НАНУ

У підписах до рис. 1 – 6 використані позначення: d_{π} , L_{π} – діаметр і довжина підвідної труби; h – глибина занурення змішувача.

Відзначимо ще один цікавий та невідомий раніше результат виконаних нами досліджень. Річ у тому, що обчислені при розрахунках витратних характеристик вищезазначених ерліфтів втрати напорів на тертя $h_{\text{ТР}}$ і ковзання фаз h_k дозволяють визначити долю втрат напорів h_k у сумарних втратах $(h_{\text{ТР}} + h_k)$. Установлено, що співвідношення $h_k / (h_{\text{ТР}} + h_k)$ не є сталою величиною, а залежить від абсолютного безрозмірного тиску $\bar{P}_1 = \frac{P_1}{P_{\text{атм}}}$ (рис 7).

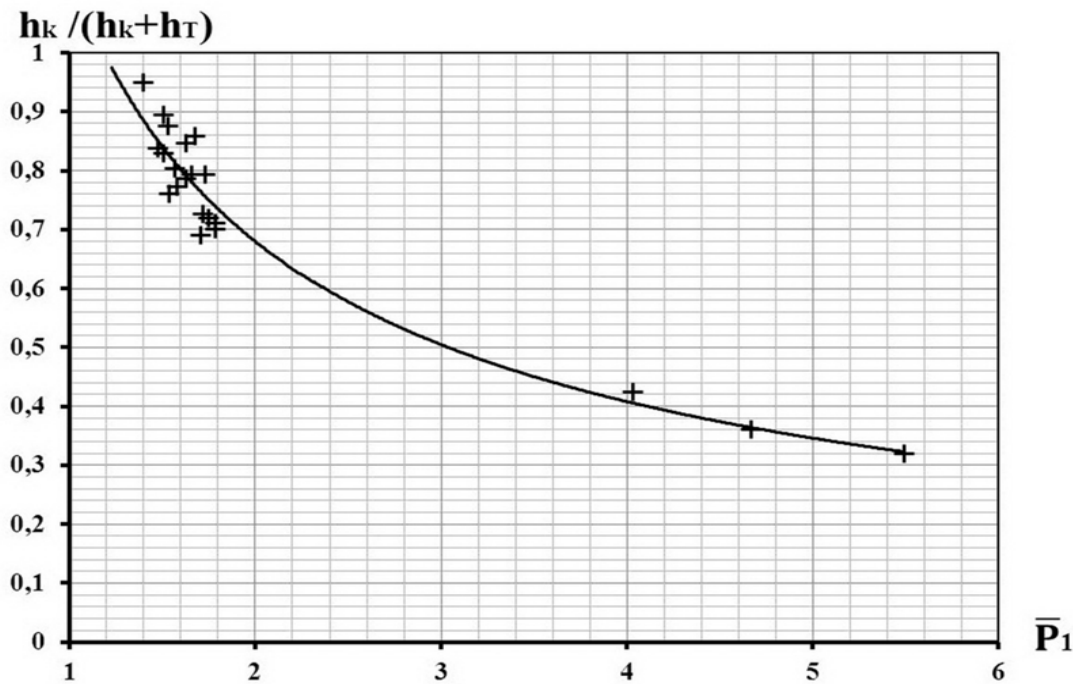


Рис. 7. Залежність $h_k / (h_{тр} + h_k)$ від \bar{P}_1 .

Згідно з рис. 7, величина h_k може складати від 30 % до 90 % повних втрат напору ($h_{тр} + h_k$). Одержаний результат стосується ерліфтів з пробковою структурою газорідної суміші

Список літератури

1. *Кириченко Е.О.* Механика глубоководных гидротранспортных систем в морском горном деле. ДНГУ, Днепропетровск. 2009. 344 с.
2. *Кутателадзе С.С., Стырикович М.А.* Гидродинамика газожидкостных систем. М.: Энергия. 1977. 249 с.
3. *Конonenко А.П.* Уравнения сохранения массы и импульса вертикально восходящего водовоздушного потока в подъемной трубе эрлифта // Промышленная гидравлика и пневматика, №3(13). 2006. С.44-48.
4. *Приходько М.А.* Гідродинаміка бульбашкових газо-паро-рідинних систем. К.: Інст. гідромех. НАН України. 2007. 473 с.
5. *Уоллис Г.* Одномерные двухфазные течения. М.: Мир. 1977. 440 с.
6. *Кріль С.І.* Гідралічні рівняння для усталеного ізотермічного руху газорідних сумішей в трубах // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки. К.: КНУБА. Вип.22. С.132-139.
7. *Адамов Б.И.* Исследование и разработка глубоководных эрлифтных установок для подъема твердого материала: Дисс...канд.техн.наук: 05.05.06: Донецк: ДПИ, 1982. 323 с.

8. *Стифеев Ф.Ф.* Разработка эрлифтов для подъема пульп повышенной плотности: Дисс...канд.техн.наук: 05.05.06: Донецк: ДПИ, 1985. 262 с.

9. *Кононенко А.П.* Теория и рабочий процесс эрлифта //Дисс...докт.техн.наук: 05.05.06: Донецк, 2007. 565 с.

10. *Криль С.И., Скороход И.В., Фадеичев В.В., Орлова Л.С.* К вопросу об определении расходной характеристики эрлифта на основе гидравлических уравнений течения газожидкостных смесей в вертикальных трубах // Проблемы водопостачання, водовідведення та гідравліки. К.: КНУБА. Вип.25. 2015. С.131-136.

11. *Криль С.И., Кононенко А.П.* Определение истинного газосодержания водовоздушного потока в подъемной трубе эрлифта // Проблемы водопостачання, водовідведення та гідравліки. К.: КНУБА. Вип.23. 2014. С.154-161.

12. *Криль С.И., Кононенко А.П.* О потерях напора на трение при движении водовоздушной смеси в подъемной вертикальной трубе эрлифта // Проблемы водопостачання, водовідведення та гідравліки. К.: КНУБА. Вип.24. 2014. С.155-163.

13. *Козыряцкий Л.Н.* Исследование и разработка уточненного расчета эрлифтных установок горной промышленности: Дисс...канд.техн.наук: 05.05.06: Донецк: ДПИ, 1976. 197 с.

14. *Стегниенко А.П.* Исследование и разработка методов управления режимами работы шахтных эрлифтов: Дисс...канд.техн.наук: 05.05.06: Донецк: ДПИ, 1978. 242 с.

15. *Костанда В.С.* Исследование и разработка эрлифтных и углесосно-эрлифтных подъемников гидрошахт: Дисс...канд.техн.наук: 05.05.06: Донецк: ДПИ. 1963, т.І. 209с., т.ІІ. 140 с.

Стаття надійшла до редакції 3.05.17