

О. С. Марценюк, д-р техн. наук

П. М. Немирович, канд. техн. наук

О. М. Віценко

*Національний університет
харчових технологій*

І. М. Пастушенко

*Український науково-дослідний
інститут цукрової промисловості*

МЕТОДИКА ГІДРАВЛІЧНОГО РОЗРАХУНКУ ГАЗОРІДИННИХ ЦИРКУЛЯЦІЙНИХ ТРУБ

Об'єктом досліджень є газорідинні циркуляційні труби. В їхню нижню частину через відповідний розподільний пристрій подається газ або пара. Пара подається у рідини, нагріті до температури кипіння. Бульбашки газу після виходу з розподільного пристрою піднімаються і захоплюють з собою прилеглі до них шари рідини, створюючи спрямований вгору потік газорідинної суміші. Такі пристрої є різновидом гідроструминних насосів, а за типом використовуваної фази та створюваним ефектом називаються ще ерліфтами та парліфтами. Зверху і знизу циркуляційна труба може мати короткі розтруби: знизу – конфузор (звужувач), зверху – дифузор (розширювач), які сприяють зниженню місцевих гідравлічних опорів на вході в трубу і виході з неї.

Метою гідравлічного розрахунку є визначення газовмісту та швидкості циркуляції суміші всередині труби, а також необхідного тиску і витрати стиснутого газу на створення циркуляції, за якими можна визначати інші параметри процесу та розміри апаратів. Точний розрахунок ускладнюється особливостями гідродинаміки газорідинних середовищ, що рухаються всередині труб. При розрахунках

газорідинних середовищ використовуються усереднені емпіричні дані та методи теорії подібності. За допомогою сумарного коефіцієнту опору системи розрахована швидкість руху повітряноводяної суміші у циркуляційній трубі. Запропонована методика розрахунку циркуляційних труб може бути використана для проектування відповідного обладнання.

Ключові слова: Газорідинна суміш, ерліфт, циркуляційна труба, коефіцієнт опору.

Інтенсивність масообмінних процесів залежить від швидкостей відносного руху контактуючих фаз, якою обумовлюється ступінь оновлення поверхні контакту фаз [1, 2]. У ряді випадків, зокрема в процесах сорбції та екстрагування, з метою посилення перемішування використовують метод циркуляції робочих середовищ за допомогою встановлення всередині апаратів циркуляційних труб, під нижній переріз або в нижню частину яких через відповідний розподільний пристрій подають газ або пару (пару подають у рідини, нагріті до температури кипіння).

Бульбашки газу після виходу з розподільного пристрою піднімаються і захоплюють з собою прилеглі до них шари рідини, створюючи спрямований вгору потік газорідинної суміші. На виході з труби газ відокремлюється від рідини і відводиться з апарата, а рідина у просторі між корпусом апарата і трубою опускається і може знову надходити у циркуляційну трубу.

Такі пристрої по суті є різновидом гідроструминних насосів, а за типом використовуваної фази та створюваним ефектом їх називають ще ерліфтами та парліфтами. Циркуляційні труби використовують, наприклад, в апаратах для проведення сатурації [3], екстрагування, для замочування солодового зерна у спиртовій і пивоварній промисловості [2]. Економічна доцільність використання циркуляційних труб у газорідинних апаратах обумовлена тим, що енергія газового потоку в

багатьох випадках може бути використана не тільки на створення тісного контакту фаз, а й одночасно на організацію циркуляційного перемішування без встановлення додаткових перемішуючих пристроїв. Ерліфти застосовують також для підняття за рахунок стиснутого повітря води із артезіанських свердловин і суміші сипких матеріалів з водою на висоту 10 м і більше.

Внаслідок подачі достатньої кількості газу в нижню частину ерліфта утворюється досить однорідна газорідинна суміш, густина якої менша від густини рідини, що знаходиться поза трубою. Рух у циркуляційній трубі створюється за рахунок різниці густин зовнішньої рідини і газорідинної суміші всередині труби ерліфта. Зменшення гідростатичного тиску по мірі підняття бульбашок газу всередині піднімної труби ерліфта призводить до їх розширення, сприяє збільшенню швидкості руху газорідинної суміші.

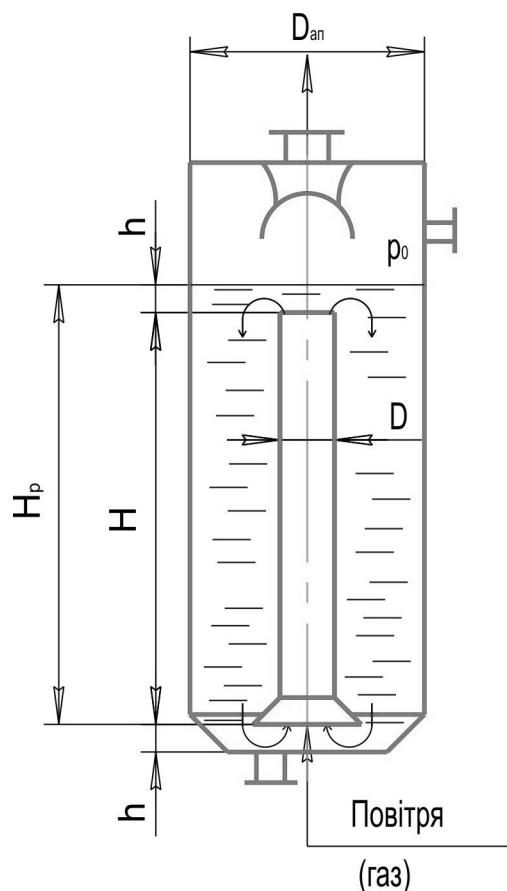


Рис. Схема апарата з циркуляційною трубою

Схема апарата з циркуляційною трубою показана на рисунку. Циркуляційні труби встановлюють вертикально всередині заповнених рідиною апаратів так, щоб нижній їх край знаходився на певній відстані h від дна апарата, а верхній край був нижче рівня рідини в апараті також на величину h , яка повинна перевищувати чверть внутрішнього діаметра D циркуляційної труби. Ця мінімальна відстань h розраховується за умовою рівності швидкостей рідини в перерізі циркуляційної труби і в кільцевих перерізах на вході в трубу та на виході з неї, щоб не створювати підвищених місцевих опорів у цих зонах. Позначивши h відстань від нижнього краю труби до дна апарата і рівну їй відстань від верхнього краю труби до рівня рідини в апараті, отримаємо:

$$\pi \cdot D \cdot h \geq \pi \cdot D^2 / 4, \text{ звідки}$$

$$h \geq D/4 \text{ або } h \geq R/2, \quad (1)$$

де R – внутрішній радіус циркуляційної труби, м.

Відстань між нижнім краєм циркуляційної труби і дном апарата може бути збільшена при розміщенні під трубою пристрою для подачі газу (барботера). Розподільувач газу може бути встановлений і безпосередньо у нижній частині циркуляційної труби. Зверху і знизу циркуляційна труба може мати короткі розтруби: знизу – конфузور (звужувач), зверху – дифузор (розширювач), які сприяють зниженню місцевих гідравлічних опорів на вході в трубу і виході з неї.

Метою гідравлічного розрахунку є визначення газовмісту та швидкості циркуляції суміші всередині труби, а також необхідного тиску і витрати стиснутого газу на створення циркуляції, за якими можна визначати інші параметри процесу та розміри апаратів. Точний розрахунок ускладнюється особливостями гідродинаміки газорідних середовищ, що рухаються всередині труб. Рух газорідних середовищ характеризуються великою кількістю параметрів, закономірності зміни яких значно складніші, ніж для однорідних середовищ, часто носять статистичний характер і не мають однозначних аналітичних рішень, тому

при розрахунках використовують усереднені емпіричні дані та методи теорії подібності [4]. Проте і в цьому випадку можна дати загальні рекомендації щодо методики розрахунку.

Тиск стиснутого повітря p , що подається в циркуляційну трубу, повинен перевищувати суму тисків, необхідну для подолання опору стовпа рідини висотою H_p і густиною ρ_p над місцем введення повітря $p_{ст.р} = \rho_p \cdot g \cdot H_p$, Па і опору в трубопроводі газу $p_{тр}$, Па, який в першому наближенні можна прийняти рівним 20 % від опору, створюваного стовпом рідини

$$p_{тр} = 0,2 \cdot p_{ст.р} = 0,2 \cdot \rho_p \cdot g \cdot H_p \quad (2)$$

і тиску p_0 над рідиною в апараті. Тоді:

$$p = 1,2 \cdot p_{ст.р} + p_0 = 1,2 \cdot \rho_p \cdot g \cdot H_p + p_0, \text{ Па.} \quad (3)$$

Необхідною вимогою створення циркуляції всередині труби є різниця густин рідини в апараті ρ_p і газорідинної суміші $\rho_{сум}$. Рушійна сила у циркуляційній трубі висотою H [2]:

$$\Delta p = H \cdot (\rho_p - \rho_{сум}) \cdot g, \text{ Па.} \quad (4)$$

Створюваний стовпом рідини напір (у м):

$$H = \Delta p / (\rho_p - \rho_{сум}) \cdot g. \quad (5)$$

В усталеному режимі циркуляції, якщо знехтувати рухом, створюваним динамічним напором газового струменя, рушійна сила зрівноважується сумою гідравлічних опорів $\sum \zeta$ у циркуляційній трубі: опору на тертя газорідинної суміші всередині труби $\zeta_{сум}$ та опорів на вході в трубу $\zeta_{вх. сум}$ і виході з неї $\zeta_{вих. сум}$:

$$H = \frac{\omega^2}{2 \cdot g} \cdot \sum \zeta, \text{ м,} \quad (6)$$

де $\sum \zeta = \zeta_{сум} + \zeta_{вх. сум} + \zeta_{вих. сум}$.

Підставивши значення H і Δp із формули (6) і (4) у рівняння (5) отримаємо швидкість циркуляції суміші в трубі:

$$\omega = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot H \cdot [1 - (\rho_{\text{сум}} / \rho_p)]}{\sum \zeta}}, \text{ м/с.} \quad (7)$$

У рівнянні (7) для визначення ω невідомі густина газорідинної суміші у циркуляційній трубі і значення коефіцієнтів гідравлічних опорів ζ , які в свою чергу залежать від швидкості циркуляції ω . Тому точно визначати ω можна лише методом підбору, та й то в тому разі, якщо відомі функціональні залежності $\rho_{\text{сум}}$ і ζ від ω для розглядуваних умов руху газорідинної суміші, що є досить складною задачею. Тому скористаємось узагальненими експериментальними даними і рекомендаціями для газорідинних потоків.

Важливою характеристикою газорідинних потоків є їх середній об'ємний газовміст $\beta = \frac{\omega_g}{\omega_p + \omega_g}$. У газорідинному потоці газ рухається дещо швидше, ніж рідина, тобто відбувається певне проковзування фаз, внаслідок чого об'ємна частка газу в суміші більша, ніж це було б у статичному стані. Нехтуючи проковзуванням (відносною швидкістю фаз) можна записати:

$$\beta \approx \frac{V_g}{V_p + V_g} = \frac{V_g}{V_{\text{сум}}};$$

$$V_g = \beta \cdot V_{\text{сум}}, \text{ м}^3, \quad (8)$$

де V_p і V_g – об'єми газу і рідини в газорідинному потоці; $V_{\text{сум}}$ – загальний об'єм суміші, м^3 .

Густина суміші:

$$\rho_{\text{сум}} = \rho_p \cdot (1 - \beta) + \rho_g \cdot \beta, \text{ кг/ м}^3. \quad (9)$$

Для створення режиму активної циркуляції об'ємний газовміст суміші доцільно брати в межах $\beta \approx 0,3 \dots 0,5$, коли реалізується переважно емульсійний режим руху з великою кількістю в суміші відносно невеликих (з середнім діаметром 3...4 мм) бульбашок газу, що досить рівномірно

розподіляються і інтенсивно взаємодіють з рухомим потоком рідини, створюючи псевдооднорідну (квазігомогенну) газорідинну систему.

Середня швидкість спливання бульбашок газу в початковий період формування режиму руху дорівнює близько 0,25 м/с. Внаслідок деформації газових бульбашок і швидкого заповнення ними всього перерізу труби швидкість руху бульбашок і гідродинамічні характеристики газорідинного шару мало залежать від розміру отворів і живого перерізу пристрою для підведення газу, повітря чи пари (барботера). У змочуваних піднімних трубах на їх внутрішній поверхні формується плівка рідини, а газ по мірі підняття намагається поступово перерозподілитись у центральну частину потоку.

Складні закономірності руху газорідинних середовищ певною мірою пояснюються характером спливання окремих бульбашок повітря у великому об'ємі води ($p = 0,1$ МПа, $t = 20$ °С). Внаслідок нерівномірного розподілу тиску по контуру бульбашок останні деформуються, приймаючи форму, що нагадує шапку гриба з випуклою верхньою поверхнею і майже горизонтальною нижньою. Внаслідок стисливості газу деформація бульбашок приводить до пульсацій їх об'єму, швидкості і траєкторії руху. Бульбашки спливають не вертикально, а звивистою траєкторією.

Бульбашки діаметром до 2 мм практично залишаються сферичними (не деформуються) і швидкість їх спливання зі збільшенням діаметра зростає до 0,3 м/с. Збільшення діаметра бульбашок від 2 до 5 мм супроводжується все більшою їх деформацією і швидкість спливання окремих бульбашок у цьому діапазоні зменшується до 0,2 м/с. Подальше збільшення (визначеного за об'ємом) діаметра бульбашок від 5 до 20 мм внаслідок їх спливання приводить до повільного прямолінійного зростання середньої швидкості спливання до 0,3 м/с – настає практично автотельна течія відносно в'язкості рідини (числа Re), коли опір

спливанню залежить від форми бульбашок. В емульсійному середовищі рух окремих бульбашок газу ускладнюється внаслідок їх взаємодії.

Значення об'ємного газовмісту потоку β в циркуляційних трубах менше 0,3 приймати не доцільно внаслідок відчутного зниження різниці густин рідини і суміші і, відповідно, рушійної сили процесу. При значеннях $\beta \geq 0,5$ залежно від розмірів труб і властивостей фаз збільшується вірогідність переходу до снарядного режиму течії, що характеризується періодичним проходженням великих циліндричних бульбашок, діаметр яких сумірний з діаметром труби, а довжина може бути значно більшою. За кожним таким газовим “снарядом” рухається рідка пробка, що містить дрібні бульбашки газу. Для розрахунку приймаємо об'ємний газовміст $\beta = 0,4$. Для цього газовмісту визначаємо коефіцієнти опорів, користуючись монографією [4].

Коефіцієнт гідравлічного опору на тертя в трубах з газорідинною сумішшю $\zeta_{\text{ер}}$ для квазігомогенної моделі течії можна подати як добуток коефіцієнта гідравлічного опору однофазного рідкого середовища ζ_p і вибраного відповідно до обставин процесу коефіцієнта пропорційності φ , який залежить головним чином від газовмісту суміші β . Коефіцієнт пропорційності φ для сумішей з $\beta < 0,8$ приймає значення від 1 до 1,15, а при $\beta > 0,8$ від 1 до 0,45. Для значення $\beta = 0,4$ середнє значення $\varphi \approx 1,1$, тоді [4]:

$$\zeta_{\text{сум}} = \varphi \cdot \zeta_p = 1,1 \cdot \zeta_p. \quad (10)$$

Коефіцієнт місцевого опору виходу повітряноводяної суміші з труби враховує додаткову перебудову потоку внаслідок відділення газової фази і приблизно дорівнює [4]:

$$\zeta_{\text{вих. сум}} = 1,2, \quad (11)$$

тобто дещо перевищує аналогічний коефіцієнт $\zeta_{\text{вих. р}} = 1,0$ для однорідної рідини.

Місцеві опори на вході газорідинної суміші в трубу значно ускладнюються внаслідок поширення збурюючої дії входу на значну довжину труби, що приводить до зміни гідродинаміки двофазного потоку на довгій вхідній ділянці труби. У межах невеликих швидкісних напорів при швидкостях руху порядку до 1 м/с і близько до атмосферного тисків коефіцієнт місцевого опору входу в трубу можна прийняти [4]

$$\zeta_{\text{вх. сум}} = 1,3, \quad (12)$$

що перевищує значення аналогічного коефіцієнта для однорідної рідини $\zeta_{\text{вх. р}} = 0,5$.

Об'ємну витрату газу (пари) V за відомими швидкістю газорідинної суміші ω , газовмістом β і діаметром D труби розраховуємо за рівнянням:

$$V = \beta \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \omega, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (13)$$

а приведену швидкість руху рідини в трубі:

$$\omega_p = \omega \cdot (1 - \beta), \text{ м/с}. \quad (14)$$

Знаючи швидкість руху рідини в циркуляційній трубі, за відношенням поперечних перерізів циркуляційної труби і апарата розраховують швидкість циркуляції рідини в просторі між корпусом апарата і циркуляційною трубою.

З метою створення помірної швидкості циркуляції відношення висоти труб H до їх діаметра D повинно бути більшим 5. Занурення верхнього краю труби під рівень рідини не повинно значно перевищувати діаметра труби, оскільки при глибокому зануренні шар рідини над трубою буде уповільнювати циркуляцію. Якщо в циркуляційній трубі рухаються тверді частинки, швидкість руху рідини в трубі повинна принаймні в 1,3 рази перевищувати швидкість осідання частинок, а діаметр труб з метою попередження їх можливого забивання повинен не менше ніж у 3 рази перевищувати максимальний розмір твердих частинок.

Близькі до розглядуваної теми питання розрахунку гідроструминних насосів і установок для транспортування гідросумішей відображені в літературі [5–7].

Для прикладу розрахуємо швидкість руху повітряноводяної суміші у циркуляційній трубі діаметром 150 мм і висотою 1,1 м за нормальних умов. Об'ємний газовміст суміші $\beta = 0,4$.

Густина суміші у циркуляційній трубі за рівнянням (9) $\rho_{\text{сум}} = 1000 \cdot (1 - 0,4) + 1,3 \cdot 0,4 = 600,5 \text{ кг/м}^3$. За виразами (11) і (12) коефіцієнт опору входу в трубу $\zeta_{\text{вх. сум}} = 1,3$, виходу з труби $\zeta_{\text{вих. сум}} = 1,2$. Коефіцієнт гідравлічного опору на тертя в трубі спочатку розраховуємо за параметрами однофазної рідини як $\zeta_p = \lambda \cdot \frac{H}{D}$. Коефіцієнт гідравлічного тертя λ визначаємо за формулою Альтшуля [1] $\lambda = 0,11 \cdot \left(\Delta + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25}$, у якій абсолютну шорсткість внутрішньої поверхні труби Δ приймаємо $\Delta = 0,2 \text{ мм}$, а число Рейнольдса розраховуємо за прийнятою у першому наближенні швидкістю води в трубі $\omega_p \approx 1 \text{ м/с}$.

$$\text{Re}_p = \frac{\omega \cdot d \cdot \rho}{\mu} = \frac{1 \cdot 0,15 \cdot 1000}{0,001} = 150000.$$

Маємо $\lambda = 0,11 \cdot \left(0,0002 + \frac{68}{150000} \right)^{0,25} = 0,018$, $\zeta_p = 0,018 \cdot \frac{1,1}{0,15} = 0,132$ і за рівнянням (10) $\zeta_{\text{сум}} = 1,1 \cdot 0,132 = 0,145$. Сумарний коефіцієнт опору системи $\sum \zeta = 1,3 + 1,2 + 0,145 = 2,645$.

Підставивши отримані значення $\rho_{\text{сум}}$ і $\sum \zeta$ у рівняння (7) отримаємо:

$$\omega = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \cdot 1,1 \cdot [1 - (600,5 / 1000)]}{2,645}} = 1,8 \text{ м/с}.$$

У приведеному розрахунку при визначенні числа Re була прийнята швидкість води $\omega_p = 1 \text{ м/с}$, а отриманий результат $\omega = 1,8 \text{ м/с}$. Оскільки значення числа Re у формулі Альтшуля підставляється у степені 0,25,

то похибка у розрахунку буде малою по відношенню до точності
приблизно прийнятих значень $\zeta_{\text{вх. сум}}$ і $\zeta_{\text{вих. сум}}$.

Більш точно швидкість циркуляції суміші в трубі знаходять методом послідовних наближень, підставляючи знайдене значення ω у формули для визначення числа Рейнольдса і коефіцієнта гідравлічного тертя.

Висновок. Запропонована методика гідравлічного розрахунку піднімних газорідинних циркуляційних труб, встановлених всередині масообмінних апаратів, може бути використана для проектування відповідного обладнання.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Процеси і апарати харчових виробництв: Підручник / За ред. проф. І. Ф. Малежика.* – К.: НУХТ, 2003. – 400 с.
2. *Стабников В. Н., Баранцев В. И.* Процессы и аппараты пищевых производств. – М.: Легк. и пищ. пром-сть, 1983. – 328 с.
3. *Логвін В. М.* Інтенсифікація першої сатурації. – К.: Мін. освіти України ІЗ МН УДУХТ, 1998. – 224 с.
4. *Кутателадзе С. С., Стырикович М. А.* Гидродинамика газожидкостных систем. – М.: Энергия, 1976. – 296 с.
5. *Берман Л. Д., Ефимочкин Г. И.* Методика расчета водоструйного эжектора // Теплоэнергетика. – 1964. – № 7. – с. 44, 48; № 8. – с. 92–94.
6. *Лобанов Д. П., Смолдырев Н. Е.* Гидромеханизация геологоразведочных и горных работ. – М.: Недра, 1982. – 432 с.
7. *Лимаев Б. Ф.* Гидроструйные насосы и установки. – Л.: Машиностроение, 1988. – 256 с.

Одержана редколегією 5.04.11 р.

А. С. Марценюк, д-р техн. наук

П. М. Немирович, канд. техн. наук

А. Н. Виценко

Национальный университет

пищевых технологий

И. Н. Пастушенко

Украинский научно-исследовательский

институт сахарной промышленности

МЕТОДИКА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ГАЗОЖИДКОСТНЫХ ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ ТРУБ

Объектом исследований являются газожидкостные циркуляционные трубы. В их нижнюю часть через соответствующее распределительное устройство подается газ или пар. Пар подается в жидкости, нагретые до температуры кипения. Пузырьки газа после выхода с распределительного устройства поднимаются и захватывают с собой прилегающие к ним шары жидкости, образуя направленный вверх поток газожидкостной смеси. Такие устройства являются разновидностью гидроструйных насосов, а за типом используемой фазы и образующим эффектом называются еще эрлифтами и парлифтами. Сверху и снизу циркуляционная труба может иметь короткие раструбы: снизу – конфузор (сужитель), сверху – диффузор (расширитель), которые способствуют понижению местных гидравлических сопротивлений на входе в трубу и выходе из нее.

Целью гидравлического расчета является определение газосодержания и скорости циркуляции смеси внутри трубы, а также необходимого давления и расхода сжатого газа на образование циркуляции, за которыми можно определить другие параметры процесса и размеры аппаратов. Точный расчет усложняется особенностями гидродинамики газожидкостных сред, которые

двигаются внутри труб. При расчетах газожидкостных сред используются усредненные эмпирические данные и методы теории подобия. С помощью суммарного коэффициента сопротивления системы рассчитана скорость движения воздуховодяной смеси в циркуляционной трубе. Предложенная методика расчета циркуляционных труб может быть использована для проектирования соответствующего оборудования.

Ключевые слова: Газожидкостная смесь, эрлифт, циркуляционная труба, коэффициент сопротивления.

O. Martsenyuk, d-r of techn. sciences

P. Nemyrovych, cand. of techn. sciences

O. Vitsenko

National university of food technologies

I. Pastushenko

*Ukrainian scientifically-experimental
institute of sugar industry*

METHOD OF HYDRAULIC CALCULATION OF GAS-LIQUID CIRCULATION PIPES

The object of researches is a gas-liquid circulation pipes. Gas or steam is given in the lower part through their appropriate distribution device. Steam is given in liquid, heated to boiling temperature. Bubbles of gas, after leaving the distribution device, rise and capture of an adjacent fluid layers, creating an upward flow of gas-liquid mixture. Such devices are form of hydro-jet pumps and by the type of used phase and the effect are called erlifts and parlifts. Above and bottom circulation pipe may have a short mouth: bottom – confusor (narrower), above – diffuser (dilator), which helps to reduce local hydraulic resistances at the entrance of the pipe and out of it.

The purpose of hydraulic calculation is to determine gas content and speed of circulation mixture inside the pipe and the necessary pressure and the cost of compressed gas in a circulation, which can determine other process parameters and dimensions of apparatus. Accurate calculation is complicated by the peculiarities of hydrodynamics of liquid-gas environments, moving inside pipes. In calculating of gas-liquid environments average empirical data and methods of similarity theory are used. With the help of total coefficient of resistance speed of air-water mixture is calculated. The offered method of the calculation of circulation pipes can be used for planning of the proper equipment.

Key words: *Gas-liquid mixture, erlift, circulation pipe, coefficient of resistance.*