

- Набиуллин, Р. Ш. Анализ и разработка конструктивной схемы оборудования для вторичного дробления пород [Текст] : дис. ... канд. тех. наук / Р. Ш. Набиуллин. – Екатеринбург, 2008. – 104 с.
- Набиуллин, Р. Ш. Новые технические решения для разрушения негабаритов в условиях карьеров [Текст] / Р. Ш. Набиуллин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – № 6. – С. 251–252.
- Данилов, А. В. Определение работы на разрушение горных пород при локальном динамическом нагружении [Текст] : Сб. док. III межд. науч.-тех. конф. / А. В. Данилов // Нетрадиционные технологии и оборудование для разработки сложно-но-структурных МПИ. Чтения памяти В. Р. Кубачека. – Екатеринбург : УГТУ, 2005. – С. 46–49.
- Угрюмов, И. А. Обоснование основных параметров гидромолота с беззолотниковым блоком управления для экскаваторов [Текст] : дис. ... канд. тех. наук / И. А. Угрюмов. – Омск, 2004. – 112 с.
- Федулов, А. И. Ударное дробление крепких материалов [Текст] / А. И. Федулов, Р. А. Иванов. // Механизация строительства. – 2005. – №1. – С. 7–9.
- Коробійчук, В. В. Дослідження впливу характеристик гідроударних установок на їх продуктивність [Текст] / В. В. Коробійчук, О. В. Мозговенко // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. – 2009. – № 1 (48). – С. 160–167.

*Проведений аналіз наукових та патентних даних по гідродинаміці об'ємних реакторів для проведення газорідних реакцій, в тому числі апаратів з самоусмоктуючими мішалками, виявлені основні проблеми по створенню методики розрахунку таких апаратів. На експериментальному стенді були проведені лабораторні випробування з гідродинаміки руху транзитного потоку в середині самоусмоктуючої мішалки, а також запропонована методика розрахунку коефіцієнту витрати*

*Ключові слова: окиснення, озон, сульфювання, хлорування, когазовміст, самоусмоктуюча мішалка, гідродинаміка, коефіцієнт витрати*

*Проведен анализ данных по гидродинамике объемных реакторов для проведения газожидкостных реакций, в том числе и аппаратов с самовсасывающими мешалками, выявлены основные проблемы по созданию методики расчета таких аппаратов. На экспериментальном стенде были проведены исследования по гидродинамике движения транзитного потока в середине самовсасывающей мешалки, а также предложена методика расчета коэффициента расхода*

*Ключевые слова: окисление, озон, сульфирование, хлорирование, газосодержание, самовсасывающая мешалка, гидродинамика, коэффициент расхода*

УДК 532.517: 66.063

## УДОСКОНАЛЕННЯ ПЕРЕМІШУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ГАЗОРІДНИХ РЕАКТОРІВ ОБ'ЄМНОГО ТИПУ

В. Я. Стороженко

Кандидат технічних наук, професор\*

В. І. Склабінський

Доктор технічних наук, професор\*

С. В. Шабрацький

Аспірант\*

E-mail: shabracky@rambler.ru

\*Кафедра процеси та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв  
Сумський державний університет  
вул. Римського-Корсакова 2,  
м. Суми, Україна, 40007

### 1. Вступ

У масообмінних процесах, зокрема для систем газ-рідина, апарати об'ємного типу з перемішувачами пристроями у багатьох випадках є найбільш перспективними в сучасній хімічній, нафтохімічній та мікробіологічній промисловості. Особливо це стосується процесів, які супроводжуються хімічною ендотермічною або екзотермічною реакцією, наприклад, процесів хлорування, сульфювання, окислення та ін. В другій половині двадцятого століття в цьому напрямку були проведені фундаментальні дослідження та розроблені нові конструкції апаратів об'ємного типу з механічним диспергуванням газового реагенту, продуктивність яких в основному залежить від діаметру та ча-

стої обертання механічних пристроїв. Підвищення продуктивності таких апаратів приводить до збільшення їх енергоємності. В той же час питанню гідродинаміки руху усмоктуючого реагенту в середині самоусмоктуючих мішалок не приділялося належної уваги. Вивчення гідродинаміки руху транзитного потоку та удосконалення конструктивних елементів мішалок з метою зменшення коефіцієнту витрати на шляху руху усмоктуючих реагентів є актуальною проблемою.

### 2. Літературний огляд

У класичних апаратах об'ємного типу з перемішувачами пристроями газовий реагент зазвичай подаєть-

ся під мішалку через: трубу-барботер [1], барботер, що представляє собою трубу, вигнуту у вигляді тору [2] з перфорації діаметром 2-3 мм або пристрою для розподілу газу [3], виконаному у вигляді кільцевого трубчатого елемента із пористого металокерамічного матеріалу над яким розташований відбійник у вигляді полутору, або пристрою у вигляді усіченого конуса [4], вершина якого має отвори для виходу газу, а в його середині розташований барботер. В цих апаратах диспергування газового реагенту або повітря в об'ємі рідини відбувається за допомогою відкритих або закритих турбінних мішалок [5]. Основною метою їх є також створення розвинутої міжфазної поверхні за рахунок інтенсивного дроблення бульбашок газового реагенту та рівномірного розподілу його по всьому перемішувачому об'єму. Ускладнення конструкції пристроїв для диспергування газу в рідині за задумом авторів [6] дозволяє підвищити ефективність розчинення газу в рідині. Диспергування газового реагенту в зону реакції в цих апаратах можливе за умови, якщо в газопроводі та барботері підтримується надмірний тиск, що перевищує тиск висоти стовпа рідини в апараті та суму витрат, пов'язаних з рухом газового реагенту.

Більш ефективними пристроями для усмоктування та диспергування газу є турбінні мішалки відкритого та закритого типу, які обертаються в коаксіально розташованій трубі, що переходить в конусне кільце з радіально закріпленими статорними пластинами [7]. Таке конструктивне виконання розподільного пристрою для газового реагенту дає можливість використовувати багаторазову рециркуляцію газу. Для таких цілей використовуються пристрої для змішування газу з рідиною [8, 9].

Крім турбінних самоусмоктуючих мішалок заслуговують на увагу перемішувачі пристрої роторно-струменевого типу [10, 11], які представляють собою ротор у вигляді перевернутого стакану, на утворюючій його поверхні розміщені порожнисті лопаті. Мішалка працює таким чином: під час обертання валу в порожнисті мішалки та лопатей виникає відцентрова сила, за допомогою якої рідина, що знаходиться в середині мішалки, витікає з порожнистих лопатей в перемішувачий об'єм. На її місце усмоктується рідина з нижньої частини апарату через отвір ротору мішалки, відтворюючи циркуляцію рідини, що перемішується.

В виробництві сульфонола НП-3 основною стадією, яка має вплив на якість кінцевого продукту, є стадія сульфидування алкілбензолів газоподібною сумішшю сірчаного ангідриду і повітря. Реакція сульфидування проходить при високій швидкості та значному тепловому ефекту [12, 13] при температурі 45-50 °C в реакторі. Тому, для підтримки якості продуктів реакції, необхідно ретельно підтримувати температуру в зоні проведення реакції.

В разі підвищення температури або недотримання співвідношення реагентів виникають побічні реакції, які збільшують ступінь окрасу алкілбензолсульфокислоти та знижують вихід основного продукту.

Використання об'ємних реакторів для таких виробництв є неефективним, тому що в разі припинення подачі газового реагенту або зниження його тиску на стадії сульфидування, рідкий реагент (алкілбензол) з об'єму реактору заповнює внутрішні об'єми пристрою для розподілу газового реагенту. Після відновлен-

ня подачі газового реагенту між залишками алкілбензолу і сірчанним ангідридом відбувається реакція сульфидування без необхідного теплообміну. При цьому продукти реакції накопичуються на внутрішній поверхні, це приводить до зменшення поперечного перетину труб барботера або пристрою для розподілу газового реагенту і закупорки вихідних отворів продуктами пересульфидування.

В технологічних схемах виробництва сульфонола НП-3, розроблених фірмою «Маріо Балестра» [13], на лінії подачі газового реагенту до об'ємних реакторів вставлені додаткові механізми, що підсилюють та підтримують необхідний тиск в колекторі та барботері під час зупинки реактору або подачі газового реагенту. Це приводить до ускладнення технологічної схеми виробництва, але в повній мірі не позбавляє виробництво від випуску неякісної продукції.

Неефективність класичних барботерів в апаратах об'ємного типу особливо відчутна в технологічних схемах на стадіях проведення газорідних реакцій з низьким тиском по газовому реагенту. А підтримка надмірного тиску газового реагенту в трубопроводах і барботері для таких технологічних процесів, як сульфидування, озонування, хлорування вуглеводнів, приводить до ускладнення технологічних схем та їх умов експлуатації. Для таких процесів були розроблені нові конструкції самоусмоктуючих мішалок [14].

В роботах [15, 16] відмічається ефективна робота самоусмоктуючих мішалок [14] в апаратах об'ємного типу під час хлорування пасивних вуглеводнів. Газовий реагент в вище описаних реакторах проходить з розподільного пристрою через порожнистий вал в порожнину ротору самоусмоктуючої мішалки і лопаті змінюючи швидкість і напрям руху. При цьому втрата енергії руху газового потоку складається з втрати тиску при вході транзитного потоку з порожнистого ротора мішалки в щілини, через які ротор поєднується з порожнистими лопатями, яку теоретично можна визначити з урахуванням місцевого опору щілини та конструктивних особливостей [17, 18].

Гідродинаміка в об'ємних апаратах з перемішувачими пристроями описана в монографіях [19, 20] та наукових працях [21, 22]. Експериментальні випробування значної кількості різних типів самоусмоктуючих мішалок [21] дали підставу розділити їх на чотири групи, в залежності від форми поверхні конструктивних елементів, що створюють розрідження. Злокарнік М. [21] показав доцільність використання самоусмоктуючих мішалок для проведення реакцій між хімічно активними газовими реагентами і агресивними рідинами, продукти реакцій яких мають властивості прилипати до внутрішньої поверхні барботерів і забивати отвори та нерухомі частини газорозподільних пристроїв.

Продуктивність самоусмоктуючих мішалок по газовій фазі та рідині залежить від частоти обертання, діаметра та глибини занурення мішалки, отже, для збільшення кількості усмоктуваного газового реагенту необхідно збільшувати частоту обертання або діаметр мішалки. На виробництві ці параметри роботи реактору оперативнo змінювати неможливо. Ефективність роботи мішалки визначається кількістю усмоктуваного газового реагенту в режимі самоусмоктування, яка залежить від площі перетину каналів та

місцевого опору на шляху його руху [23]. Тому можливо зробити припущення, що зменшення впливу місцевих опорів на шляху руху усмоктуемого газу дозволить значно збільшити продуктивність самоусмоктуючих мішалок. Гідродинаміку руху газового реагенту у середині самоусмоктуючої мішалки на ділянці переходу з порожнини ротора в порожнисті лопаті можна представити аналогічно гідродинаміки витікання рідини з резервуару через насадок, яка достатньо описана в літературі [17, 18]. В той же час досліджень з гідродинаміки руху усмоктуемого (транзитного) потоку та впливу місцевого опору в середині самоусмоктуючих мішалок на їх продуктивність недостатньо.

Метою цієї роботи є вивчення гідродинаміки руху транзитного потоку в середині мішалок та пошук оптимальних конфігурацій елементів конструкції самоусмоктуючих мішалок, які забезпечують максимальну продуктивність.

### 3. Методика проведення дослідження гідродинаміки руху транзитного потоку в середині самоусмоктуючих мішалок

Гідродинаміку в апараті об'ємного типу з самоусмоктуючою мішалкою досліджували на експериментальному стенді, схема і загальний вид апарату зображені на рис. 1 та рис. 2. Лабораторна модель об'ємного апарату (рис. 1, а) представляє собою вертикальний циліндричний посуд 1, виконаний з органічного скла, з плоским дном 2 та кришкою 3. Дослідна модель самоусмоктуючої мішалки 4 закріплюється на полуму валу 5, який приводиться до обертання за допомогою електродвигуна постійної напруги. Вал 5 представляє собою складну конструкцію, яка складається з однорідної верхньої частини валу, до якої приварена трубка. Швидкість обертання мішалки контролювали за допомогою електронного числового тахометру. Кількість транзитного газу (усмоктуючого повітря мішалкою) вимірювалась газовим годинником типу ГСБ-400. З метою попередження появи вирви під час обертання мішалки, в апараті встановлено три перегородки 7 шириною 0,1 діаметра апарату. На кришці 3 апарату укріплена розподільча камера 13, яка складається з циліндричної оболонки з штуцером для подачі повітря 15. По осі кришки апарату на розподільчому пристрої змонтований підшипниковий вузол 12, в якому обертається вал 5, установлений по осі апарату. Швидкість обертання валу змінювали від 3,0 до 25,0 об/с і контролювали за допомогою електронно-числового тахометру типу ТЦ-3М. Розподільча камера 13 ізолювана від зовнішнього середовища і апарату за допомогою гумових манжетів 6. В зоні розподільчої камери 13 вал 5, його трубна частина має отвори 14 для проникнення повітря. Такий монтаж валу дає можливість проводити перекачування повітря в режимі самоусмоктування та проводити контроль його залежно від числа обертання валу 5. Дослідні моделі самоусмоктуючих мішалок 4 закріплюють на торці трубки валу 5. Апарат заповнювали водою на певну висоту, яку контролювали за допомогою міліметрової шкали.

Під час обертання самоусмоктуючої мішалки 4 повітря через газовий лічильник 7 і патрубок 15 потра-

пляє в розподільчий пристрій 13 далі через отвори 14 поступає в трубчасту частину валу 5 і порожнину ротора самоусмоктуючої мішалки 4. Під дією відцентрових сил і розрідження, що виникає при обтіканні лопаті мішалки повітря із порожнини ротора потрапляє в порожнисті лопаті, з яких диспергує у вигляді бульбашок в перемішуваний об'єм.

Апарат (рис. 1, б) може працювати в неперервному режимі по рідині. Витрату води під час випробування різних самоусмоктуючих мішалок контролювали за допомогою ротаметра РС-5.

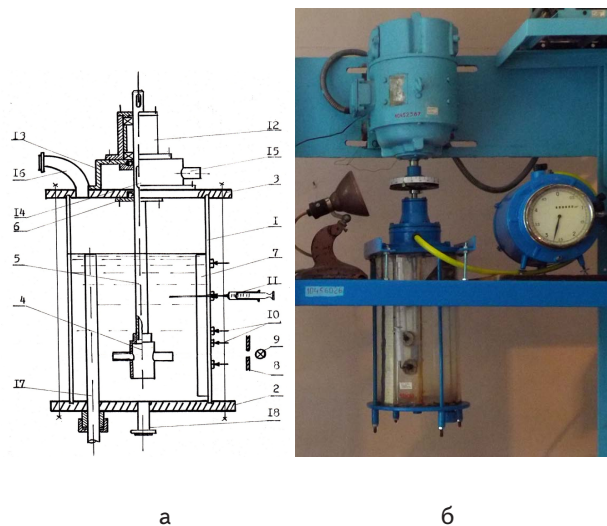


Рис. 1. Лабораторна модель об'ємного апарату: а – схема лабораторної моделі об'ємного апарату з самоусмоктуючими мішалками: 1 – вертикальний циліндричний посуд; 2 – днище; 3 – кришка; 4 – самоусмоктуюча мішалка; 5 – полий вал; 6 – ущільнення; 7 – відбивна перегородка; 8 – екран; 9 – джерело світла; 10 – точки відбору проб; 11 – шприц медичний з голкою-зондом; 12 – підшипниковий вузол; 13 розподільча камера; 14 – вхідний отвір в полий вал; 15, 16 – вхідний та вихідний патрубки для газу або повітря; 17 – переливна труба; 18 – вхідний патрубок для рідини або води; б – фото експериментального стенду для випробувань самоусмоктуючих мішалок

Були проведені дослідження з вивчення продуктивності самоусмоктуючих мішалок по газовій фазі в режимі самоусмоктування. На лабораторному стенді проводилися експериментальні випробування апаратів з самоусмоктуючими мішалками [10, 11, 14], що представляють собою перевернутий стакан, на бічній поверхні якого розміщені прорізи, що переходять в порожнисті лопаті. Усмоктування газового реагенту (транзитного потоку) відбувається за рахунок розрідження, яке створюється в порожнині мішалки під час її обертання.

На рис. 2 приведені дані продуктивності по газовій фазі самоусмоктуючих мішалок діаметром 0,065; 0,126; 0,168 та 0,180 м з циліндричними лопатями. Моделі самоусмоктуючих мішалок випробовувались в апараті діаметром 0,24 м з трьома відбивними перегородками на глибині занурення 0,12-0,37 м.

Аналіз одержаних даних показує, що продуктивність самоусмоктуючих мішалок залежить від числа оборотів, діаметра та глибини занурення самоусмок-

туючої мішалки. Продуктивність самоусмоктуючих мішалок залежить від ступеню розрідження, яке виникає при обертанні мішалки в рідині апарату. Розрідження, що виникає в середині самоусмоктуючої мішалки, приводить до того, що повітря із розподільчого пристрою через порожнистий вал засмоктується в перемішуємий об'єм. Поступове збільшення частоти обертання самоусмоктуючої мішалки приводить до збільшення розрідження в середині мішалки, яке перевищує величину гідростатичного тиску стовпа рідини в апараті і втраг при перетіканні повітря в каналах мішалки. Початок усмоктання газу не співпадає з початковою частотою обертання і залежить від глибини занурення та діаметру мішалки. В період проведення випробувань поява перших бульбашок в перемішуемому об'ємі фіксували, як частоту початкового обертання мішалки. Спочатку продуктивність мішалки більшої за 5 об/с продуктивність по газовій фазі зростає швидко і має майже лінійну залежність. Збільшення діаметра мішалки від 0,065 до 0,18 м також приводить до суттєвого зростання продуктивності газового потоку в режимі самоусмоктання. В той же час, збільшення глибини занурення мішалки в апараті приводить до зменшення продуктивності по газовій фазі.

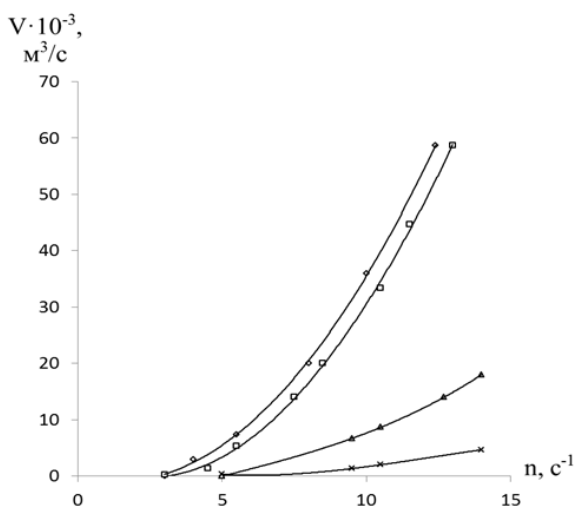


Рис. 2. Залежність продуктивності самоусмоктуючої мішалки  $V$  по газовій фазі від швидкості обертання мішалки  $n$  при постійній глибині занурення. Діаметр самоусмоктуючих мішалок:  $\diamond$ - $d = 0,180$  м;  $\square$ - $d = 0,168$  м;  $\Delta$ - $d = 0,126$  м;  $\times$ - $d = 0,065$  м

Підсос газу або повітря та його диспергування в перемішуємий об'єм можливий в випадку, коли різниця тиску в порожнині лопаті і в зоні обертання мішалки відповідає рівнянню

$$\Delta p \geq \Delta p_{гс} + \sum \Delta p_m, \quad (1)$$

де  $\Delta p_{гс} = \rho g H$ , тут  $H$  – висота рідини над мішалкою;  $\sum \Delta p_i$  – сума місцевих опорів, що виникають на шляху руху газового або рідинного потоку (транзитного потоку). Тоді продуктивність самоусмоктуючої мішал-

ки по транзитного потоку  $Q$  можливо вирахувати по формулі

$$Q = \mu S_0 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}, \quad (2)$$

де  $\mu = \epsilon \phi$  – коефіцієнт витрати, який дорівнює добутку коефіцієнтів стиснення і швидкості струменю,  $S_0$  – площа перетину лопатей мішалки.

В даному випадку продуктивність мішалки залежить від місцевого опору та коефіцієнту витрати, який залежить від гідродинаміки руху транзитного потоку в середині самоусмоктуючої мішалки. Для цього були виготовлено декілька лабораторних циліндричних пристроїв (рис. 3), які повторюють форму та геометричні параметри лабораторної моделі самоусмоктуючої мішалки.

Лабораторний циліндричний пристрій (рис. 3, а) з різною конфігурацією щілинного отвору (рис. 3, б) вмонтовується в експериментальну схему (рис. 4, а) для проведення випробувань впливу конфігурації вхідного отвору на витрати транзитного потоку. Фото установки для проведення досліджень показано на рисунку (рис. 4, б). Відношення сторін прямокутного отвору складає 1:4, що відповідає відношенню плоскої порожнистої лопаті мішалки.

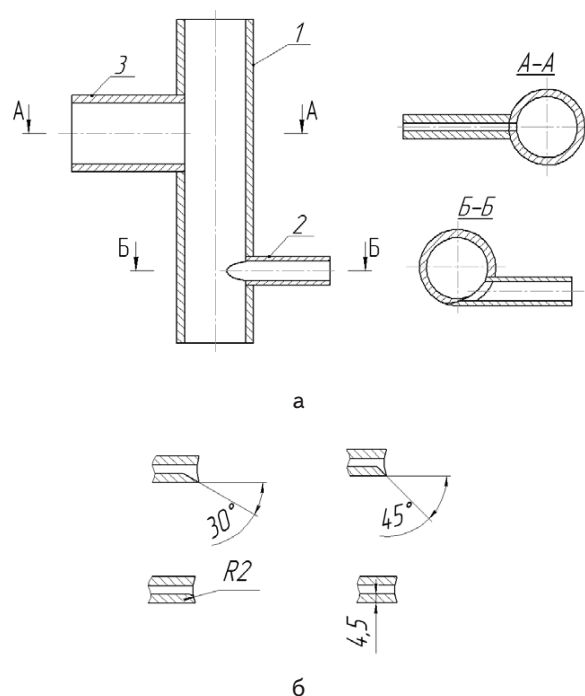


Рис. 3. Пристрій для проведення лабораторних досліджень а – загальна схема лабораторного пристрою: 1 – порожниста циліндрична трубка; 2 – штуцер для подачі рідини; 3 – насадок, копія лопаті лабораторної моделі самоусмоктуючої мішалки; б – насадки різних конфігурацій

В процесі експерименту кількість рідини регулювали за допомогою вентиля 2 і контролювали по ротаметру 4, тиск в циліндричному пристрою 1 визначали по п'єзометричній трубці 6, закріпленій на кришці пристрою. Для усунення пульсації потоку в нижній



частині пристрою розмістили тонкоструйний струєви-прямовувач. В даному випадку попередні випробування показали, що спосіб подачі води, осьовий або тангенціальний в циліндричній пристрій 1, не має суттєвого значення. Під час випробувань проводили вимірювання п'езометричного тиску в лабораторному пристрої та швидкість витікання рідини.

Для оцінки впливу конфігурації вхідного щілинного отвору на опір витіканню рідини, кромки вхідної щілини в досліджуваних лабораторних моделях насадка 7 були виготовлені різної форми: для базової моделі щілинний отвір виготовлений з прямими краями, а для других моделей щілинний отвір мав округлення радіусом, рівним 0,5-1 ширини щілини; інші моделі мали щілинний отвір, в якому одна вертикальна кромка має скіс під кутом 60° і 45°. Досліди повторювалися по 5-7 раз, отримані середньозважені дані випробувань заносилися в таблиці.

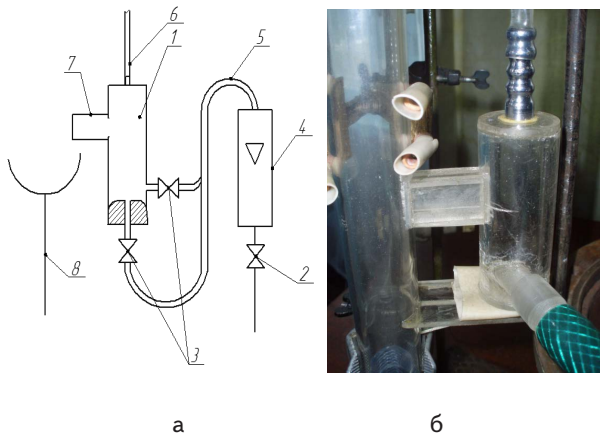


Рис. 4. Лабораторний стенд для випробування гідродинаміки транзитного потоку: а – Схема лабораторного стенду для випробування гідродинаміки транзитного потоку в середині самоусмоктуючої мішалки: 1 – порожнистий пристрій у вигляді циліндричної трубки; 2 – вентиль для регулювання подачі рідини; 3 – вентилі і штуцера для подачі рідини; 4 – ротаметр; 5 – трубка подачі рідини; 6 – п'езометр; 7 – насадок, що повторює в перетині лопать самоусмоктуючої мішалки; 8 – каналізаційний трубопровід; б – Фото лабораторного стенду для випробування гідродинаміки транзитного потоку в середині самоусмоктуючої мішалки

#### 4. Результати випробувань витікання транзитного потоку з ротора мішалки в порожнисту лопать та їх обговорення

При витіканні рідини з трубки пристрою через вертикальну прямокутну щілину в прямокутний насадок струмень рідини стискається і після досягнення мінімального перерізу відбувається його подальше поступове розширення так же, як і при витіканні через отвір в тонкій стінці. При цьому між стисненою частиною струменю і внутрішньою поверхнею прямокутного насадка розташована вихрова зона. Далі струмень рідини розширюється до повного перетину насадка і витікає при цих параметрах то ступінь стиснення при-

ймається рівним  $\epsilon = 1$ , а коефіцієнт швидкості дорівнює коефіцієнту витрати  $\phi = \mu$ . В ході лабораторних випробувань було встановлено, що коефіцієнт витрати рідини залежить від конфігурації вхідного отвору та числа Рейнольдса. Для прямокутного насадка зі скошеною вертикальною кромкою при числах Рейнольдса, більших за 25000, настає автоматичний режим витікання рідини, що супроводжується постійним значенням коефіцієнта витрати, який залежить тільки від кута скосу вхідного отвору (рис. 3). При цьому потік, витікаючи з щілини, долає місцевий опір, що виникає завдяки особливості конструкції вхідного отвору. Зміна конфігурації однієї кромки щілинного отвору: закруглення або скіс кромки приводять до зменшення коефіцієнта місцевого опору вхідного отвору та зміни коефіцієнта витрати і, як наслідок, до збільшення об'єму перетікання транзитного потоку. Під час випробувань витрати рідини, п'езометричний тиск в середині лабораторного пристрою записувалися в таблиці, які стали основою для подальших розрахунків коефіцієнту витрати  $\mu$  по формулі

$$\mu = \frac{Q}{S\sqrt{2gH}}, \tag{3}$$

де  $Q$  – витрати рідини через лабораторний пристрій,  $m^3/c$ ;  $H$  – висота стовпа рідини в п'езометричній трубці,  $m$ ;  $S$  – величина поперечного перетину щілинного отвору,  $m^2$ .

Виконані дослідження показали, що величина коефіцієнта витрати залежить від радіуса закруглення, при чому збільшення радіуса закруглення до величини рівної ширини щілини приводить до збільшення коефіцієнту витрати на 25-40 % в порівнянні з аналогічними випробуваннями базового пристрою з прямими кромками (рис. 5). Збільшення кута скосу однієї кромки щілинного отвору від 90° (прямої кромки), до 60° та 45° приводить до збільшення витрати рідини, при чому найбільше значення коефіцієнта витрати відповідає куту скосу, рівному 45° (рис. 6). Одержані результати з гідродинаміки руху транзитного потоку в лабораторних пристроях дозволяють зробити висновки, що зміна конфігурації вхідної кромки отвору приводить до суттєвого збільшення коефіцієнту витрати, а отже, до збільшення продуктивності транзитного потоку.

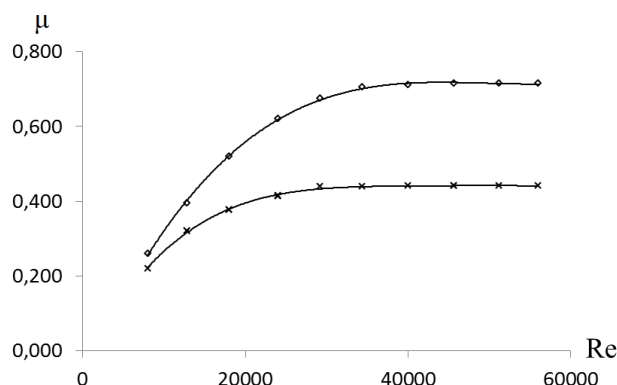


Рис. 5. Залежність коефіцієнта витрати  $\mu$  від критерію Рейнольдса для щілинного насадка з вхідним отвором із прямими краями та однією округлою кромкою: x – прямі,  $\diamond$  – одна кромка в щілинному отворі закруглена

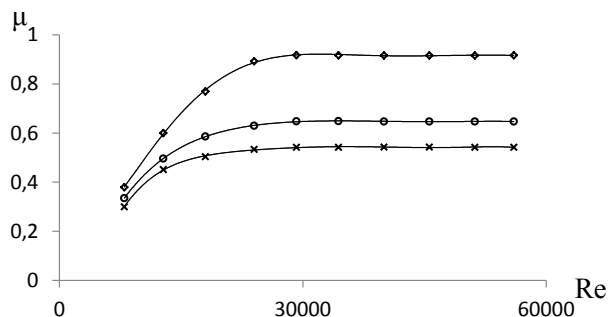


Рис. 6. Залежність коефіцієнта витрати  $\mu$  від критерію Рейнольдса для щілинного насадка з вхідним отвором із скошеною кромкою (кут скосу щілинного отвору  $\diamond - 45^\circ$ ,  $\circ - 60^\circ$ ,  $\times - 90^\circ$ )

Проведені дослідження показали, що коефіцієнт витрати транзитного потоку залежить від радіусу закруглення та кута скосу кромки щілинного отвору. При числах Рейнольдса більше 30000 коефіцієнт витрати має постійну величину і може бути визначений по емпіричній залежності

$$\mu = 0,5 + 0,957 \cos^2 \theta - 0,986 \cos \theta, \quad (4)$$

де  $\theta$  – кут скосу вхідної кромки вертикального прямокутного щілинного насадка.

Отримані результати дають можливість проводити розрахунки по продуктивності самоусмоктуючих мішалок із зміненою конфігурацією вхідної кромки, яка прилягає до фронтальної сторони лопаті мішалки. Лабораторні випробування показали, що продуктивність

мішалок по газовій фазі в режимі самоусмоктування збільшилася на 20-25 %.

## 5. Висновки

Проведені дослідження з гідродинаміки руху транзитного потоку показали, що зміна конфігурації вхідного отвору в порожнисту лопать самоусмоктуючої мішалки дозволяє збільшити продуктивність транзитного потоку в режимі самоусмоктування за рахунок збільшення коефіцієнта витрати  $\mu$ . Це у свою чергу дало можливість провести зміни конфігурації вхідної кромки лопаті самоусмоктуючої мішалки і без збільшення діаметра мішалки або частоти обертання досягти збільшення продуктивності транзитного потоку в режимі самоусмоктування. Випробування таких мішалок на лабораторному стенді дозволили розробити вдосконалену конструкцію самоусмоктуючої мішалки та отримати патент України [24].

Як показали дослідження, самоусмоктуючі мішалки мають невисокий енергетичний ККД, проте гарне дроблення газу забезпечує більшу площу поверхні контакту фаз, ставить ці перемішуючі пристрої по питомим енерговитратам на один рівень з високопродуктивними диспергуючими пристроями.

Використання цих самоусмоктуючих мішалок в газорідних реакторах на наш розсуд є більш ефективне від існуючих в промисловості. Вони можуть бути впроваджені в виробництва на стадіях, наприклад, хлорування індантрона або антрахінона, сульфурвання алкілбензолів газоподібним сірчанам ангідридом, та озонування вуглеводнів.

## Література

- Соколов, В. Н. Газожидкостные реакторы [Текст] / В. Н. Соколов, И. В. Доманский. – Л., «Машиностроение» (Ленингр. отд-ние), 1976. – 216 с.
- Васельцов, С. А. Аппараты для перемешивания жидких сред [Текст] / С. А. Васельцов, В. Г. Ушаков. – Л.: Машиностроение, 1979. – 272 с.
- А. с. № 993969 (СССР) Теплообменный аппарат [Текст] / Шишкин А. В., Карпович, А. И., Иванов В. В. и др. – Оpubл. 07.02.83 в Б.И. №5.
- А. с. № 1357061 (СССР) Газожидкостной реактор [Текст] / Шишкин А. В., Турунцев Г. В. и др. – Оpubл. 07.12.87 в Б.И. № 45.
- А. с. № 648249 (СССР) Турбинная мешалка [Текст] / Дронов Г. В., Зайцев В. А. и др. – Оpubл. 25.02.79 в Б.И. № 7.
- А. с. № 1299613 (СССР) Устройство для диспергирования газа в жидкости [Текст] / Васельцов Э. А., Мороз Т. А., Егорова Г. Г. – Оpubл. 30.03.87 в Б.И. № 12.
- Васильев, А. В. Исследование массообмена в автоклавах с самовсасывающими мешалками [Текст] / А. В. Васильев, В. А. Зайцев, Т. П. Горшкова, А.С. Пестов // Химическое и нефтехимическое машиностроение 1978. – № 9. – С. 13–16.
- А. с. № 814429 (СССР) Устройство для смешения газа с жидкостью [Текст] / Стронгин Г. М., Матвеев А. С., Гришин Ю. А. – Оpubл. 23.03.81 в Б.И. № 11.
- А. с. № 1318271 (СССР) Устройство для смешения жидкости с газом [Текст] / Голубев А. Р., Марков В. А., Ершов А. И. и др. – Оpubл. 23.06.87 в Б.И. № 23.
- Парафенко, Н. И. Новые роторно-струйные перемешивающие устройства [Текст]: сб. докл. / Н. И. Парафенко, М. Я. Розкин // Теория и практика перемешивания в жидких средах. – М.: НИИТЭХИМ, 1973. – С. 175–180.
- Парафенко, Н. И. Исследование самовсасывающей мешалки с радиально-вытекающими струями [Текст] / Н. И. Парафенко, М. Я. Розкин, А. И. Барвин, А. В. Микуленко // Химическое и нефтехимическое машиностроение. – 1973. – № 7. – 14 с.
- Беркман, Б. Е. Сульфирование и щелочное плавление в промышленности органического синтеза [Текст] / Б. Е. Беркман. – М.: ГОСХИМИЗДАТ, 1960. – 268 с.
- Неволин, Ф. В. Химия и технология синтетических моющих средств. [Текст] / Ф. В. Неволин. – М.: Издат. «Пищевая промышленность», 1971. – 424 с.

14. А.с. 771089 СССР Способ получения алкиларилсульфокислот или кислых алкилсульфатов и устройство для его осуществления [Текст] / Стороженко В. Я., Барвин В. И., Шабрацкий В. И. и др. Опубл. 1980. – Бюл. №38.
15. Шабрацкий, В. И. Изучение экологических показателей хлорирования пассивных органических соединений [Текст] : матер. II Всес. науч.-техн. совещ. / В. И. Шабрацкий, В. И. Роговик и др. // Пути совершенствования, интенсификации и повышение надежности аппаратов в основной химии. – Сумы, 1982. – 260 с.
16. Шабрацкий, В. И. Применение реакторов емкостного типа с всасывающей мешалкой для хлорирования пассивных органических соединений [Текст] : матер. VIII Все. конф. / В. И. Шабрацкий, В. И. Роговик, И. Я. Бедусенко // Химреактор. – Чимкент, 1983. – С. 253–258.
17. Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. [Текст] / И. Е. Идельчик. – М.: «Машиностроение», 1975. – 559 с.
18. Идельчик, И. Е. Определение коэффициентов сопротивления при истечении через отверстия [Текст] / И. Е. Идельчик // Гидротехническое строительство. – 1953. – № 5. – С. 31–36.
19. Стренк, Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками [Текст] / Ф. Стренк. – Л.: Химия, 1975. – 384 с.
20. Брагинский, Л. Н. Перемешивание в жидких средах: Физические основы и инженерные методы расчета. [Текст] / Л. Н. Брагинский, В. И. Бегачев, В. М. Барабаш. – Л.: Химия, 1984. – 336 с.
21. Zlokarnik, M. Auslegung vor Hohlruhreru sur Flussig keits begasung [Text] / M. Zlokarnik // Chem.-Jus.- Techn. – 1966. – Jg 38, № 3. – P. 357–366.
22. Ерофеев, А. А. Газосодержание в жидкости при перемешивании механическими мешалками [Текст] / А. А. Ерофеев, Г. Н. Петыхина // Химическое и нефтехимическое машиностроение. – 1976. – № 10. – С. 18–20.
23. Белкин, Д. И. К расчету эжекционной производительности самовсасывающих мешалок по жидкости [Текст] : матер. 6 міжн. наук.-прак. конф. / Д. И. Белкин, В. И. Шабрацкий, В. И. Барвин, С. В. Шабрацкий. – Полтава, 2010. – С. 41–44.
24. Патент України № 60097 Пристрій для перемішування рідин [Текст] / Шабрацький В. І., Белкін Д. І., Барвін В. І., Шабрацький С. В. – Бюл. № 11, 2011.

*Розроблено теоретичні основи методу оцінки стійкості транспортних засобів при розгерметизації їх коліс. Визначено час повної розгерметизації шини автомобільного колеса. Зазначений метод дозволяє визначати величини повертаючого моменту і радіуса повороту автомобіля з різними радіусами коліс з урахуванням тертя в диференціалі*

*Ключові слова: автомобіль, стійкість, колесо, відведення, прокол, пробій, повертаючий момент, судово експертиза*

*Разработаны теоретические основы метода оценки устойчивости транспортных средств при разгерметизации их колес. Определено время полной разгерметизации шины автомобильного колеса. Указанный метод позволяет определять величины поворачивающего момента и радиуса поворота автомобиля с различными радиусами колес с учетом трения в дифференциале*

*Ключевые слова: автомобиль, устойчивость, колесо, увод, прокол, пробой, поворачивающий момент, судебная экспертиза*

УДК 343.98

## ЭКСПЕРТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА ПРИ РАЗГЕРМЕТИЗАЦИИ ЕГО КОЛЕСА

**М. А. Подригало**  
Доктор технических наук, профессор\*  
E-mail: pmikhab@rambler.ru

**Д. М. Клец**  
Кандидат технических наук, доцент\*  
E-mail: prof\_777@mail.ru

\*Кафедра технологии машиностроения и ремонта машин  
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет  
ул. Петровского, 25, г. Харьков, Украина, 61002

### 1. Введение

Расследование дорожно-транспортных происшествий (ДТП) требует от следователей и судей повышения эффективности работы с целью справедливого наказания виновных. Одним из действен-

ных средств улучшения указанной работы является наиболее полное использование возможностей судебных автотехнических и транспортно-трасологических экспертиз. Известные экспертные исследования, посвященные оценке курсовой устойчивости автомобилей [1, 2], не рассматривают влияние раз-