

Список літератури

1. Залесов О.А. Армирование вертикальных стволов шахт и ее исследование на электронных моделирующих устройствах. – М.: Недра, 1966.
2. Маскин В.К., Агманских С.К., Рубцов В.А., Сухарева Н.А. Армирование вертикальных стволов шахт при применении крепи облегченной конструкции. – М.: «ЦВЕТМЕТИНФОРМАЦИЯ». 1967. – 50 с.
3. Баклашов В.И. Расчет, конструирование и монтаж армировки стволов шахт. – М.: Недра, 1973.
4. Пособие по проектированию и монтажу жесткой армировки вертикальных стволов шахт и рудников (к СНиП 11-94-80). М.: Недра, 1989. – 160 с.
5. Гавруцкий А.Е., Моренков Ф.А. Состояние армировки действующих шахтных стволов в Криворожском бассейне. ЦНИГРИ. Сборник научных трудов УП, М., 1963.
6. Методика расчета жестких армировок вертикальных стволов шахт. – ВНИИГМ им. М.М. Федорова. – Донецк, 1985. – 160 с.
7. Ильин С.Р. Управление состоянием стволового оборудования шахтных подъемных комплексов при длительной эксплуатации / ИГТМ НАН Украины «Горная механика»: сб. науч. тр. Вып. 58. – 2005. – с. 45-52.
8. Чередниченко О.Е., Ильин С.Р., Радченко В.К. Контроль технического состояния жесткой армировки и крепи шахтных стволов: м-лы XV юбилейной международной конференции «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики». Часть 1. – Киев, 2007.
9. Прокопов А.Ю., Курнаков В.А. Исследование влияния неточности стыков проводников на формирование ударной нагрузки при движении большегрузных скипов. // Изв. вузов. Сев-Кавк. регион. Техн. науки. – 2006. – Прил. № 9: Перспективы развития Восточного Донбасса. – с. 106-110.
10. Пестрикова В.С. Алгоритм расчета долговечности жестких армировок шахтных стволов, эксплуатируемых в условиях верхнекамского месторождения калийных солей. В ж. «Известия Тульского государственного университета. Наука о земле». 2019. С. 332-339.
11. Справочник по сопротивлению материалов / Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В.; Отв. ред. Писаренко Г.С. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Наук. думка, 1988. – 736 с.
12. Детали машин в примерах и задачах: [Учеб. пособие / С.Н. Ничипорчик, М.И. Корженцевский, В.Ф. Калачев и др.]; под общ. ред. С.Н. Ничипорчика. – 2-е изд. – Выш. школа, 1981. – 432 с.

Рукопис подано до редакції 26.03.2021

УДК 621.181:62

В.В. СУРТАСВ, канд. техн. наук, доц., Криворізький національний університет

ПІДВИЩЕННЯ ЗАГАЛЬНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК, ТЕПЛОВИХ СХЕМ СИСТЕМ, ПРИСТРОЇВ, УСТАНОВОК УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛА

Мета підвищення загальної ефективності теплоенергетичних установок, теплових схем систем, пристроїв, установок утилізації тепла - наукове завдання, проблема. Також метою розрахунків теплоутилізаторів є визначення показників стану робочих тіл (РТ) і потоків обміну теплоти й маси РТ у теплоутилізаторах з термодинамічної точки зору являють собою гомогенні або гетерогенні системи. От далеко не повний перелік актуальних питань, наукових задач і проблеми, рішення яких неможливо без розробки спеціальних методик рішення інженерно-технічних завдань, актуальних наукових задач і проблеми проектування й будівництва контактних тепломасообмінних апаратів.

Методи дослідження. Теоретичні положення, методи, постановка завдання, моделі, граничні рівноважні стани робочих тіл, узагальнені безрозмірні показники рішення завдань сталого тепло- і масопереносу тепло й масообміну в апаратах утилізації теплоти.

Наукова новизна полягає в тому, що рішення проблеми створення конденсаційно-охолоджувального пристрою установок системи пристрою утилізації тепла з теплоутилізатором на базі "форсунок камер" і ін., вимагає врахування різних факторів, що впливають на інтенсифікацію процесів тепломасообміну, що у свою чергу дозволяє вибрати найбільш раціональні режими роботи пристрою і вирішальним образом позначається на їх ефективності.

Практична значимість. Інтенсифікація тепломасообміну в конденсаційно-охолоджувальному пристрої установок, системи, пристрою з теплоутилізатором на базі "форсунок камер" і ін., досягається: високою відносною швидкістю теплоносія, що розпилюється, розвиненістю поверхні контакту між середовищами, високою дисперсністю часток теплоносія, що розпилюється, щільністю заповнення реактивного простору взаємодіючими середовищами, рівномірністю розподілу парогазового потоку уздовж поперечного перерізу контактного апарата, виконаного на базі "форсунок камер", раціональним вибором часу контакту середовищ, характером взаємного руху контактуючих середовищ.

Результати. Підвищення загальної ефективності теплоутилізаторів виконаних на базі "форсунок камер".

Ключові слова: форсунка, форсунок камер, система, пристрій, установка, ефективність, тепло – і масообмін, фактори.

Проблема і її зв'язок з науковими і практичними задачами. Рішенням наукової проблеми розробки методики розрахунку тепломасообміну в конденсаційно-охолоджувальному пристрої установки, системи, пристрою з теплоутилізатором на базі "форсуноквих камер", припускає розгляд тепломасообміну на мікрорівні й вивчення можливостей отримання розрахункових залежностей з урахуванням найбільшої кількості факторів що впливають на тепломасообмінні процеси, такий підхід до проблеми створення методики розрахунків тепломасообміну в контактному апараті, як відомо, дозволяє встановити співвідношення, що найбільше повно виражають картину процесів, що протікають.

Аналіз досліджень та публікацій. Для отримання кращої уяви про механізм взаємодії речовини краплі з парогазовою сумішшю розглянемо тепломасообмін у випадку одиначної краплі. Для випадку прогріву нерухомої краплі теплоносія, що має форму шару й однорідного по своєму складу. У початковий момент часу вся маса краплі має однакову температуру t_0 рівну температурі теплоносія на вході у форсунку, однак у процесі розпилювання крапля попадає в парогазове середовище з температурою t_{cp} і нагрівається з поверхні. Температура середовища при цьому залишається незмінна в часі [6-11].

Таким чином, розгляд процесу прогріву краплі, нерухомої щодо середовища, дозволяє зробити висновок, що значне скорочення часу нагрівання теплоносія можливо, насамперед, за рахунок поліпшення якості розпилювання й підвищення температури парогазового середовища. Однак, при такому підході, є фактори, які не повністю враховують специфіку роботи конденсаційно-охолоджувального пристрою установки, системи, пристрою з теплоутилізатором на базі "форсуноквих камер", оскільки не враховується утворення шару плівки з конденсату на поверхні краплі і пов'язаної із цим зміни режиму теплопередачі й руху краплі [1-11].

Рішення наукової проблеми створення конденсаційно-охолоджувального пристрою установки, системи, пристрою утилізації тепла з теплоутилізатором на базі "форсуноквих камер" і ін., вимагає обліку різних факторів, що впливають на інтенсифікацію процесів тепломасообміну, що у свою чергу дозволяє вибрати найбільш раціональні режими роботи пристрою і вирішальним чином позначається на їх ефективності (що, впливає й на умови роботи і конструкцію пристрою для знешкодження шкідливих викидів). Інтенсифікація тепломасообміну в конденсаційно-охолоджувальному пристрої установки, системи, пристрою з теплоутилізатором на базі "форсуноквих камер" та ін., досягається: високою відносною швидкістю теплоносія, що розпилюється, розвиненістю поверхні контакту між середовищами, високою дисперсністю часток теплоносія, що розпилюється, щільністю заповнення реактивного простору взаємодіючими середовищами, рівномірністю розподілу парогазового потоку уздовж поперечного перерізу контактної апарату, виконаного на базі "форсуноквої камери", раціональним вибором часу контакту середовищ, характером взаємного руху контактуючих середовищ. Створення ефективного конденсаційно-охолоджувального пристрою установки, системи, пристрою з теплоутилізатором на базі "форсуноквих камер" парогазових викидів вимагає врахування наведених вище факторів інтенсифікації процесів тепломасообміну.

Недоліком сучасних методів розрахунку контактних апаратів на базі "форсуноквих камер" є врахування в них конструктивних особливостей тільки окремих типів форсуноквих пристроїв, що обмежує можливості застосування інших, у тому числі і більш вдалих типів форсуноквих пристроїв. Остання обставина істотно обмежує можливості застосування різних, у тому числі, більш нових і ефективних конструкцій форсунок і схем компонування контактних апаратів. Такий підхід утруднює розробку установки, системи, пристрою з теплоутилізатором на базі "форсуноквих камер", оскільки в умовах обмежених у просторі промплощадок діючих установок - джерел парогазових викидів, він виключає можливості вибору й інших раціональних конструктивних рішень по створенню конденсаційно-охолоджувального пристрою установки, системи, пристрою з теплоутилізатором на базі "форсуноквих камер" [1-7]. При такому підході до розробки методики розрахунку установки, системи, пристрою з теплоутилізатором на базі "форсуноквих камер" ускладнений облік всіх факторів інтенсифікації процесів тепломасообміну й вибір раціональних режимів роботи контактної апарату.

Розробка методики розрахунку контактної апарату пристрою, системи, установки, з теплоутилізатором на базі "форсуноквих камер", припускає, якщо це необхідно, дослідження

впливу технологічних параметрів промислових установок - джерел парогазових викидів і інших джерел, у тому числі природних (геотермальних джерел), на ефективність роботи установки, системи, пристрою утилізації тепла.

У результаті аналізу різних конструктивних рішень і показників роботи форсунок пристроїв, обрано вид (клас) найбільш економічних і ефективних пристроїв - тангенціальні механічні форсунки. Тангенціальні форсунки одержали широке поширення в промисловості через їх конструктивну простоту і мінімальні витрати механічної енергії на розпилювання рідин. Принцип дії тангенціальної форсунки полягає в закручуванні рідини перед проходженням вихідного сопла, у результаті значно зростають відцентрові сили, які і утворюють тонку плівку кільцевого перерізу що в наслідку розпадається на дрібні краплі [6-11].

Як уже вказувалося вище, методи розрахунків установки, системи, пристрою з теплоутилізатором на базі "форсунок камер" повинні враховувати показники роботи відцентрових форсунок. До цих показників відносяться: продуктивність, кут розпилення рідини, середня і локальна щільності зрошення в перетинах на різних відстанях від форсунки, середній діаметр крапель розпиленого струменя в цілому і окремих точках її об'єму, спектр розподілу краплі по розмірах у струменю в цілому і окремих точках її об'єму, симетрія розподілу рідини по секторах. Всі ці характеристики визначаються геометрією форсунки, властивостями рідини й характером витікання. На якість розпилювання рідини форсункою, здійснювана за рахунок механічної енергії, що витрачається на подолання сил молекулярної взаємодії часток рідини, подолання сил поверхневого натягу й опору руху, впливають також, поряд з іншими факторами, в'язкість, поверхневий натяг і щільність рідини.

Постановка задачі. Необхідністю одержання показників розпилювання теплоносія тангенціальними форсунками певної конструкції для умов роботи в установках, системах, пристроях з теплоутилізатором на базі "форсунок камер" і ін., викликаний вибір базових критеріїв підбору форсунок пристроїв по ряду їх стандартних показників, на основі отриманих на експериментальній моделі, для умов конденсаційно-охолоджувальної установки, системи пристрою з теплоутилізатором на базі "форсунок камер", залежностей між критеріями і коефіцієнтами тепломасообміну отриманими при розробці методики розрахунків контактних апаратів [1-7].

Сформовані уявлення про процес розпилю, припускають його поділ на дві фази. У першій фазі розпилення відбувається за рахунок енергії тиску створюваного насосом, у другій фазі - краплі подрібнюються під дією аеродинамічних сил у середовищі плинну краплі. При розпаді струменя рушійними факторами є сили ваги, інерції, поверхневого натягу, в'язкості і тертя між середовищами. Незважаючи на існуюче різноманіття теорій рідин, що трактують розпилювання, (теорія капілярних хвиль, турбулентна, фрикційна, хрупкостна теорія), останні доповнюють одна одну й дозволяють установити всі показники ефективності роботи форсунок [6, 7, 9-11].

Викладення матеріалу і результати. Найбільший інтерес, з погляду інтенсифікації процесів контактного тепломасообміну, для системи, пристрою, установки з теплоутилізаторами на базі "форсунок камер" промислових установок - джерел парогазових викидів і інших джерел, представляє краплинна форма розпаду струменя, тому що вона забезпечує найвищу якість розпилювання, у відмінності від плівкової [6-11]. Розгляд краплинної форми розпилювання рідини дозволяє виділити групу параметрів, вплив яких визначальним чином позначається на якісних показниках роботи форсунок. Ефективність розпилювання рідини, а значить і ріст поверхні контакту в конденсаційно-охолоджувальному пристрої, пов'язаний співвідношенням відцентрових сил і сил поверхневого натягу. Якість розпилення рідини форсунками неухильно росте зі зміною цього співвідношення на користь відцентрових сил і сил інерції [6-11].

При безплівковому режимі витікання рідини з форсунки, оточуюче середовище не впливає на першу фазу розпилю. Критерієм, що характеризує першу фазу розпаду струменя в контактному апараті є залежність якості розпилювання що виражається у виді функції [6-11]

$$\frac{d_k}{d_{\text{э}}} = \frac{\nu_{\text{ж}} d_{\text{э}} \rho_{\text{ж}}}{\mu_{\text{ж}}}, \quad (1)$$

де $\nu_{\text{ж}}$ – швидкість розпилюваної рідини у вихідному каналі форсунки, м²/с; $d_{\text{э}}$ – діаметр умовного проходу сопла тангенціальної форсунки, м; $\rho_{\text{ж}}$ – щільність розпилюваної рідини, кг/м³; $\mu_{\text{ж}}$ – динамічна в'язкість розпилюваної рідини, Па·с; d_k – діаметр краплі, м.

Окрім розмірів краплі, суттєвим фактором, що впливає на інтенсифікацію тепло масообміну між краплею і парогазовим середовищем є відносна швидкість краплі. Максимальний ефект досягається при великих швидкостях руху у вихідному соплі, при цьому дріблення проходить практично незалежно від сил поверхневого натягу, а найбільш ймовірним розмірам крапель відповідають мікророзміри турбулентних часток. Дані процеси описуються на основі теорії локальної структури турбулентності А. Н. Колмогорова, що дозволяє визначити якість розпилювання незгаскаємої, в'язкої рідини при великих числах Рейнольдса. Теорія А. Н. Колмогорова пояснює розпад струменя утворенням турбулентних мікровихривів, які з ростом віддалення від форсунки, визначаються за формулами [6]

$$\lambda \approx l / \text{Re}^N, \quad (2)$$

де l - макромасштаб турбулентності, λ_1 - мікромасштаб по Тейлору, Re - число Рейнольдса, N - показник степені за результатами експериментів що відповідає значенням 0,5-0,75.

Оскільки мікромасштаб турбулентності пропорційний розміру потоку, то за характерний розмір приймають еквівалентний діаметр форсунки d_s , що дозволяє переписати формулу у вигляді [6]

$$\frac{d_k}{d_s} = \frac{\text{const}}{\text{Re}_s^N}, \quad (3)$$

де d_k - діаметр крапель, м; Re_s - число Рейнольдса для еквівалентного діаметра форсунки.

Визначення спектру розпила, для першої фази дроблення струменя, описується на основі хрупкісної теорії дроблення рідких струменей, що для умов системи, пристрою, установки, с теплоутилізатором на базі «форсунок камер», виразиться кривою спектра розпилю по Трешу

$$\frac{d(n/no)}{dx} = \frac{e^{-\beta/x}}{x^3 \int_0^1 e^{-\beta/x} x^{-3} dx}, \quad (4)$$

де x - відносний діаметр крапель $d_i/d_{k \max}$; n_0 - загальне число крапель; n - число крапель діаметром d_i ; $\beta = G \cdot \beta_{т.ф.} / d_{k \max}$, де $\beta_{т.ф.}$ - дослідна константа для тангенціальних форсунок 0,19 [6, 7].

У другій фазі розпилювання дроблення крапель відбувається за рахунок взаємодії розпилюваного теплоносія з парогазовим середовищем, що протікає під дією аеродинамічних сил і сил поверхневого натягу, і обумовленого режимом обтікання краплі потоком, структурою турбулентного потоку і в'язкими властивостями середовищ.

Незважаючи на те, що в потоці розпилю будь-якої форсунки наявні краплі широкого спектру розмірів, показники розпилення прийнято характеризувати середнім діаметром крапель, узятим по середніх числових показниках. Середній діаметр крапель обчислюється залежно від того, яке з визначальних властивостей системи є істотним у даному технологічному процесі. У загальному випадку середній діаметр обчислюється по формулі виду

$$d_{qp} = p \cdot q \sqrt{\frac{\sum d_i^p \Delta n_i}{\sum d_i^q \Delta n_i}}, \quad (5)$$

де d_i - середній діаметр частки у фракції, що нараховує Δn_i часток, мкм; p і q - цілі числа, що визначаються необхідним способом осереднення. Для умов тепло масообміну в тепло утилізаторі процесів мокрого гасіння коксу (об'ємно-поверхневий спосіб осереднення по Ликову М. В., Леончику Б. І.) величини p і q у відповідності дорівнюють 3 і 2.

Розподіл розмірів крапель у розпалюваній струї в розрахунках форсунок системи утилізації тепла розжареного коксу слідує закону великих чисел і описується формулою Розіна-Рамлера

$$R = 100e^{-\left(\frac{d_i}{d_k}\right)^n}, \quad (6)$$

де R - масова доля крапель в струмені, діаметр яких більше $d_i, \%$, d_k - постійний діаметр крапель відповідає певному значенню $R=36,79\%$, n - постійне число, що характеризує степінь різномірності крапель. При $d_i = d_k$ рівняння приймає вид, %

$$R = \frac{100}{e} = 36,79. \quad (7)$$

Це означає, що 36,79% крапель в струмені має діаметр більше d_k . Як слідство, якщо маємо криву розподілу по розмірам, то можливо для цього ж досліду визначити величину d_k по вище вказаній формулі. Інший параметр - n , який визначається для тієї ж кривої, знаходиться в результаті логарифмування рівняння Розіна-Рамлера

$$\lg \lg \frac{100}{R} = n \lg di - n \lg dk + \lg \lg e = \text{const} + n \lg di, \quad (8)$$

де n – кутовий коефіцієнт прямої що отримується графічно [6].

Таким чином, визначення якості розпилювання форсунки зводиться до визначення величин d_k і n .

Крім рівняння Розіна-Рамлера існує велика кількість залежностей, що слугують для опису розподілу часток в полідисперсній системі. Майже всі вони є чисто емпіричними.

А. Н. Колмогоров теоретично доказав, що в системах, що утворені при тривалому диспергуванні, частки розподіляються по логарифмічному нормальному закону. Побудовані на його основі формули для розрахунку розпилювання виходять досить простими, що дозволяє узагальнювати досвід розпилювання в геометрично подібних камерах.

Превага залежності Розіна-Рамлера полягає ще в тому, що при її використанні вдається відносно просто вичислити любий середній діаметр краплі в струмені по формулі [6]

$$dpq = dk \left[\frac{\Gamma\left(\frac{p-3}{n}\right) + 1}{\Gamma\left(\frac{q-3}{n}\right) + 1} \right]^{\frac{1}{p-q}}, \quad (9)$$

де Γ – символ Гамма-функції, p і q – параметр осереднення.

Хоча експерименти по вивченню якості розпилювання рідин виконуються давно, і існує велика кількість різновидів методів оцінки якісних параметрів розпилення рідин, задача знаходження залежностей для розрахунку форсунок на якість розпилювання відноситься до розряду достатньо складних. Відомі до сих пір способи визначення розмірів крапель розпиленних форсунками рідин і отримання кривих розподілу часток, що містяться в струмені, дають досить неточні результати. Методи дослідного визначення дисперсності розпилю детално описані в роботах [1-6].

В роботах [6-11] було запропоновано новий шлях обробки дослідних даних по якості розпилювання, що полягає в згладжуванні дослідних даних по якості розпилювання і графічних побудовах кривих розподілу крапель в струмені по розмірам. Число заміряних крапель в даній точці вважалось достатнім в тому випадку, якщо побудована на їх основу сумарна крива розпилювання $R_2 = 100 \left[1 - e^{-(di/dk)^n} \right]$, в логарифмічних координатах приводилась до прямої лінії, що при числі крапель порядку 50-150 завжди досягалось. Обробка дослідних даних по визначенню середнього діаметра крапель виконувалась з допомогою критеріального рівняння

$$d_k/d_3 = f(v_3 \cdot \varepsilon/v) = f(Re\varepsilon), \quad (10)$$

де $v_3 = \sqrt{2p_{ex} / \rho}$, а рівняння кривої розподілу набуло вид [6-11]

$$\frac{d_k}{d_3} = \frac{18,3}{Re_3^{0,59}}. \quad (11)$$

Остання формула відображає залежність середнього діаметра в інтервалі $2280 < Re_3 < 18280$, робочого процесу розпилювання рідини центр обіжними форсунками в першій фазі і є достатньо універсальною для різних рідин і конструкцій центробіжних форсунок.

В крапельній фазі розпаду в'язкість і поверхневе на тяжіння рідини проявляються почергово, в першій і в другій фазах. Це суттєво зменшує число критеріїв подібності що описують якісні показники роботи форсунок.

Не дивлячись на те, що розрахунки форсунок на заданий діаметр і заданий спектр розпилювання ще не знайшли достатнього розповсюдження в розрахунках технологічних параметрів роботи контактних апаратів, їх застосування просто необхідно при розробці системи, пристрою, установки утилізації тепла промислових установок –джерел парогазових викидів та ін. джерел.

Розрахунок на заданий спектр розпилення рідини виконується в такий спосіб: для цього у формулу підставляються табличні значення величин виражені через витрату G і тиск перед форсункою $p_{\text{вх}}$ [6-11]

$$d_k = 18,3 \cdot \frac{\nu^{0,59} \sqrt{3,6 \frac{4}{\pi} \frac{G}{\sqrt{20 p_{\text{вх}} \cdot \rho}}}}{\left(\sqrt{20 \frac{p_{\text{вх}}}{\rho} \sqrt{\frac{4}{\pi} \frac{G}{3,6 \sqrt{20 p_{\text{вх}} \cdot \rho}}}} \right)^{0,59}}, \quad (12)$$

Після перетворення отримаємо формулу виду [6-11]

$$d_k = 1,81 \frac{\nu^{0,59} \cdot G^{0,205} \cdot \rho^{0,195}}{P_{\text{вх}}^{0,397}}. \quad (13)$$

З урахуванням рівняння Розіна-Раммлера в логарифмічній формі і рішення відносно d_k приймає вид [6-11]

$$d_k = di / \sqrt[n]{\frac{\lg \frac{100}{R}}{\lg e}}, \quad (14)$$

виходячи з умови про необхідний рівень крапель певної дисперсності R в струмені, після підстановки, по даній формулі можна знайти значення d_k [6, 7-11]

$$d_k = 100 / \sqrt[n]{\frac{\lg \frac{100}{10}}{\lg e}}, \quad (15)$$

причому n встановлюється із кроком в інтервалі відповідної експериментальної залежності значенням. Результати розрахунку форсунки підставляються в таблицю розрахунків роботи форсунки на заданий спектр розпилювання.

З формул видно, що між витратою форсунки й середнім діаметром краплі при заданому тиску перед форсункою, існує однозначна залежність, що виражається залежністю [6-11]

$$G = \left(\frac{d_k \cdot p_{\text{вх}}^{0,397}}{1,81 \cdot \nu^{0,59} \cdot \rho^{0,192}} \right)^{4,87}, \quad (16)$$

причому для води в'язкість і щільність приймається по таблицях, відповідно до одиниць виміру прийнятими в експериментальних рівняннях, які в нашому випадку відповідають: $\nu=0,01 \text{ см}^2/\text{с}$, $\rho=1 \text{ г/см}^3$.

Підбір форсунок здійснюється в раціональному співвідношенні їхньої ефективності, продуктивності й необхідної кількості. На цій підставі визначається оптимальна величина n , що враховує конструктивні особливості форсунок і виробляється вибір форсунки з відомого конструктивного ряду.

Залежність величини n від конструкції форсунки виражається формулою [6]

$$R/r_c = (4,42 - n) / 0,42. \quad (17)$$

Встановивши величину R/r_c при раціональному n , підбираємо геометрію форсунки по спеціальним таблицям [6-11] попередньо вчислив величину $\frac{G}{\sqrt{p_{\text{вх}}}}$. В результаті вибираються

значення d_c , $d_{\text{вх}}$, R , n , D_k , $f_{\text{вх}}$ та ін. Правильність розрахунку звичайно підтверджується експериментально.

При розробці й застосуванні форсуноквих пристроїв системи, пристрою, установки, з теплоутилізатором на базі "форсуноквих камер", можуть виявитися обмеження по розмірах і комплектуванню контактних апаратів, що вимагатиме обліку більш широкого набору характеристик форсунок. Одним з таких параметрів є кут розпилення рідини форсункою, від якого залежить частина поперечного перерізу контактного апарату для роботи однієї або декількох форсуноквих пристроїв, і, відповідно, інтенсивність процесів тепломасообміну.

Вплив кута росточки сопла форсунки i , відповідно факела розпилювання, на роботу тангенціальної механічної форсунки визначається відомою залежністю для коефіцієнта витрати форсунки $\mu=(127-\alpha)/139$, з урахуванням комплексу відомих вихідних параметрів, серед яких G - витрата теплоносія, $p_{вх}$ – вхідний тиск в форсунці, α - кут розточки форсунки. За допомогою

таблиць [6-11] по двом параметрам $\frac{G}{\sqrt{p_{вх}}}$ і μ підбираються і другі дозуючі розміри форсунки

$d_c, D_k, f_{вх}$. Якщо в ряду стандартних форсунок не виявиться необхідної, розрахунок можна провести від зворотнього, по заданому значенню α , знаходимо μ із співвідношення $\mu=(127-\alpha)/139$.

Знаючи G, μ і $p_{вх}$, з формули $G = \mu \cdot F_c \cdot \sqrt{2p_{вх} / \rho^2}$ знаходимо r_c , задаючись відношенням R/r_c , знаходимо R і b і з рівнянь [6]

$$\mu = \frac{0,4}{\left(\frac{\pi \cdot R \cdot r_c}{f_{вх}}\right)^b} \text{ і } f_{вх} = \pi \cdot R \cdot r_c \cdot \left(\frac{\mu}{0,4}\right)^{\frac{1}{b}}, \quad (18)$$

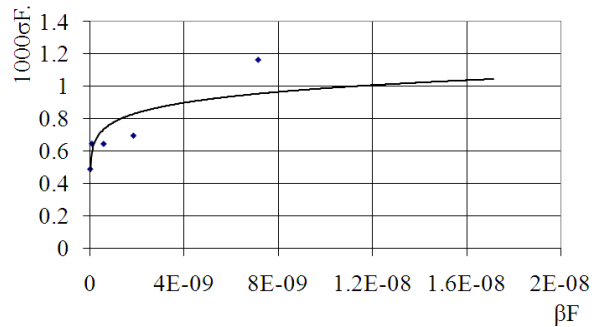
де $d_c, D_k, f_{вх}, \alpha, R/r_c, R$ і b – конструктивні параметри форсунки згідно [6-11].

При проектуванні конденсаційно-охолоджувального пристрою системи, пристрою, установки з теплоутилізатором на базі "форсункових камер", може виникнути необхідність в оцінці можливостей використання, що є в наявності на підприємствах, форсункових пристроїв, або серійно вироблених промисловістю. Для цього випадку розрахунок параметрів роботи форсунок на заданий спектр розпилю виконується виходячи з конструктивних особливостей форсунок, відповідно до встановленого режиму роботи в контактному апараті. Алгоритм розрахунку припускає знаходження спектра розпилю форсунки й щільності зрошення в камері конденсаційно-охолоджувального пристрою системи, пристрою, установки, з теплоутилізатором на базі "форсункових камер" і перевірку їхньої відповідності технологічним параметрам роботи. При цьому досягається необхідна гнучкість у виборі конструювання контактного апарата при конструюванні системи, пристрою, установки, з теплоутилізатором на базі "форсункових камер".

Емпірична залежність представлена у роботі [6] дозволяє визначити величину потоку «повної» теплоти в характеристичному елементі ФК експериментальної установки залежно від факторів формування контактної поверхні та співвідношення витрат взаємодіючих середовищ і діє в наступних інтервалах значень: 1) середньологарифмічна різниця ентальпій $\Delta I_{с.лог.}$, кДж/кг: 149,3÷304,7; 2) потік «повної» теплоти $Q_{п}$, Вт: 149÷178; 3) добуток коефіцієнта масообміну на площу контактної поверхні $1000\sigma F$: 0,48÷1,16; 4) відношення середньомасового діаметра крапель до еквівалентного діаметра сопла тангенціальної механічної форсунки d_k^y/d_E : 0,36÷0,69; 5) відношення витрати пари на вході в ФК до витрати води поданої через форсунку: 0,0043÷0,026; 6) число Re_E : 22881÷11970; 7) константа розподілу $n=2$; 8) середньологарифмічна різниця температур $\Delta t_{с.лог.}$, °С: 34÷77; 9) тепловий к. к. д. ФК експериментальної установки, η %: 75 - 98; 10) приплив конденсату до теплоносія g_k , кг/с: 5,5E-05÷6,9E-05; 11) середньологарифмічна різниця парціальних тисків $\Delta P_{с.лог.}$, кПа: 8,7÷120,4; 12) коефіцієнт масовіддачі у ФК, βF : 7,1E-09÷8,4E-12; 13) температура парогазової суміші на вході у ФК експериментальної установки $t_{вх}$, °С: 95÷110; 14) масова частка пари в парогазовій суміші φ , %: 4÷30; 15) абсолютний тиск на вході у ФК $P_{вх}$, кПа: 91,2÷131,7; 16) коефіцієнт витрати дослідної установки: $A_1=10^{-3}$ кг/с. У дослідженому інтервалі значень отримано регресійне рівняння між добутком коефіцієнта масообміну на площу контактної поверхні та комплексною характеристикою масовіддачі: $\sigma F/A_1 = \sigma F \cdot 10^3 \approx 6,02 \cdot \beta F^{0,1004}$, $R^2 = 0,7$ [6].

На основі отриманих даних результатів виконаних досліджень також отримані залежності між добутком коефіцієнта масовіддачі на площу контактної поверхні у ФК, βF та добутком коефіцієнта масообміну на площу контактної поверхні $1000\sigma F$, добутком коефіцієнта теплообміну на площу контактної поверхні, представлені у вигляді графічної залежності рис. 1.

Рис. 1. Графік залежності між добутком коефіцієнта масовіддачі на площу контактної поверхні у ФК, βF та добутком коефіцієнта масообміну на площу контактної поверхні $1000\sigma F$ (отримано в інтервалі дослідних значень [6])



Встановлено чисельні співвідношення між тепловим к. к. д. ФК η , добутком коефіцієнта масообміну на площу контактної поверхні σF і середньологарифмічною різницею ентальпій $\Delta I_{с.лог.}$.

Аеродинамічний розрахунок контактного апарата системи, пристрою, установки, з теплоутилізатором на базі "форсуноквих камер" полягає у встановленні падіння тиску при проходженні елементів контактного апарата системи, пристрою, установки, з теплоутилізатором на базі "форсуноквих камер", що досягається з використанням існуючих залежностей і співвідношень.

Конденсаційно-охолоджувальний пристрій, системи, пристрою, установки утилізації тепла парогазових викидів промислових установок - джерел парогазових викидів мокрогасіння коксу й мокрої грануляції й інших джерел, включаючи геотермальні - секційна конструкція тепломасообмінного апарата виконаного на базі "форсуноквої камери" з одне - і багатоступінчастим підігрівом теплоносія. Конденсаційно-охолоджувальний пристрій, системи, пристрої, установки утилізації теплоти джерел парогазових викидів промислових установок (морого гасіння коксу, мокрої грануляції являє собою багатосекційний контактний апарат, виконаний на базі "форсуноквої камери", із двоступінчастим підігрівом і зустрічною подачею теплоносія в секції через тангенціальні механічні форсунки. Ступені контактного апарата розділяються регульованими заслінками, що дозволяє скоротити перетікання розпиленого теплоносія із ступені в ступень і забезпечити більш рівномірну витрату парогазової суміші в контактному апараті.

Аеродинамічний опір типової горизонтальної форсуноквої камери визначається за виразом

$$[6-11] \Delta P_a = 23\rho_r \frac{V_k^2}{2g}, \text{ Па, де } \rho_r - \text{ щільність парогазового потоку в секції контактного апарату,}$$

кг/м^3 ; V_k - швидкість парогазового потоку в секції контактного апарата, м/с. Швидкість парогазового потоку в секціях контактного апарата, виконаного на базі «форсуноквої камери», встановлюється величиною поперечного перерізу секції контактного апарата і об'ємної витрати парогазової суміші і в загальному випадку швидкість може знаходитись в інтервалі від 1 до 8 м/с.

Значення падіння тиску в секції контактного апарата, установлене по формулі відповідає умовам роботи стандартної форсуноквої камери, що не цілком відповідає умовам роботи контактного апарата установки, пристрою, системи утилізації теплоти процесів гасіння коксу, мокрої грануляції металургійних шлаків (патент України №55206А "Пристрій для мокрої грануляції металургійних шлаків", патенти України №42199А і № 44003А, відповідно: "Пристрій для мокрогасіння коксу" і "Система для мокрогасіння розжареного коксу"). Це зв'язано в першу чергу з істотно більшою величиною коефіцієнта зрошення і відмінних властивостей середовища, для яких дослідним шляхом була отримана залежність представлена вище. Тому формула може використовуватись тільки в попередніх розрахунках контактного апарата виконаного на базі "форсуноквої камери" установки, системи, пристрою з теплоутилізатором на базі "форсуноквих камер", а фактичне значення падіння тиску в секціях, ступенях форсуноквих камер теплоутилізаторів може бути отримане за результатами безпосередніх випробувань промислових установок, пристроїв, систем або на дослідній установці.

Крім апаратів контактного тепломасообміну, відповідно до схем установки, пристрою, системи з теплоутилізатором на базі "форсуноквих камер", представленими на рисунках, розділ 1 [6], ще одним елементом, що розраховується, є рекуперативний теплообмінник теплової мережі. Одними з найбільш ефективних теплообмінників, які можуть застосовуватися поряд з іншими, для передачі тепла технологічних процесів, відносяться вертикальні, інтенсифіковані, рекуперативні, сталеві, кожухотрубчасті теплообмінники. Їх суцільнозварна конструкція дозволяє виключити потрапляння забрудненого шкідливими домішками теплоносія в теплові мережі (населеного пункту, міста й т.п.), а можливості використання в конструкції нержавіючих хімічно стійких марок сталей істотно продовжує строк експлуатації, як окремих секцій, так і всього теплообмінного апарата.

У розділі 4 роботи [6] детально розглянута теоретична база для проведення експериментів

заснована на використанні фізико-математичної моделі одномірного переносу теплоти й маси (α -модель) стосовно до характеристичного елемента ФК, представленої в розділі 1 і 2 пунктах 1.3, 2.3-2.5 і їхні результати представлені в розділі 4 [6].

У рамках цієї моделі тепломасообмінні процеси досліджуються в сталому режимі роботи експериментальної установки, тобто в умовах сталості в часі температур і тисків середовищ у різних точках ФК [6].

Виходячи з аналогії процесів протікають у тепломасообмінних апаратах виконаних на базі ФК, для одержання адекватної математичної моделі тепломасообміна в ступенях, секціях, характеристичному елементі ФК контактної теплоутилізатора системи утилізації теплоти мокрого гасіння коксу, у роботі [6] застосовувався прикладний регресійний аналіз, заснований на методі виключень, що дозволив досліджувати тільки те рівняння, що найбільше точно відображає фізичну картину процесу. Таким адекватним регресійним рівнянням для α -моделі переносу, з урахуванням пунктів 1.3, 2.2 і 2.3 і залежностей 1.3, 1.6 і 1.7 розділи 1, 2, є залежність для добутку коефіцієнта масообміну на площу контактної поверхні [6]

$$\sigma F = A_1^{X_1} A_2^{X_2} A_3^{X_3} \dots A_n^{X_n}, \quad (19)$$

де $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ – значення критеріїв і коефіцієнтів, що характеризують тепломасообмінні процеси, що протікають у характеристичному елементі ФК; $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ – експериментальні значення показників ступенів при критеріях і коефіцієнтах регресійного рівняння [6].

Строго говорячи, як визначальний параметр тепломасообмінних процесів може так само бути прийнятий добуток коефіцієнта теплообміну й площі контактної поверхні σF , а регресійне рівняння, для його визначення, буде, у цілому, подібно залежності представленої також у розділі 4 пункті 4.2 роботи [6]. Величини добутків коефіцієнтів обміну і площі контактної поверхні залежать від безлічі факторів включаючи: 1) зміну температури парогазового потоку на вході й виході з характеристичного елемента ФК; 2) теплових еквівалентів потоків теплоносія й парогазової суміші; 3) співвідношення між потоками "явної" і "повної" теплоти; 4) розміри й умови формування контактної поверхні і т.п. При встановленні визначальних критеріїв і коефіцієнтів як факторів тепломасообміна у ФК, автор ґрунтується на представленому в розділі 2 пункті 2.4 роботи [6] і даній роботі. обґрунтуванні вибору факторів тепломасообміна для розглянутого характеристичного елемента ФК, що полягає в іншій формі врахування факторів формування контактної поверхні, впливу конструктивних параметрів ФК, чим це прийнято в математичній моделі виражає залежністю, що, 4.5, розділ 4 роботи [6] для тепломасообмінних апаратів виконаних на базі ФК [6-11].

Для оцінки точності представлених далі експериментальних залежностей слугує квадрат множинної кореляції R^2 , що визначається у відповідності з залежністю

$$R = \frac{\sum (\bar{C}_i - \bar{C}_i)}{\sum (C_i - \bar{C}_i)},$$

де \bar{C}_i - передбачуване значення відклику; \bar{C}_i - середні значення даних експериментів що спостерігаються; C_i - експериментальні значення параметрів варіаційного ряду [6-11].

Як видно, у роботі [6], (додаток 3), представлені зведені відомості обробки експериментальних даних і характеристики дослідної установки. Тепловтрати в елементах експериментальної установки визначалися виходячи з геометричних характеристик викладених у додатку 3 роботи [6]. Для визначення параметрів парогазової суміші, включаючи: парціальні тиски, щільності компонентів, масові частки компонентів у суміші, газової постійної й інших характеристик суміші в ході експериментів, використані рівняння Менделєєва-Клапейрона, Дальтона, Фільнея й похідні від них залежності для бінарних сумішей, а також дані теплотехнічних таблиць [6-11].

При розгляді мікрорівня тепломасообмінних процесів у контактному апараті на базі "форсункової камери" виходять із двох крайніх умов прогріву одиночної краплі: прогрівом нерухомої й краплі, що рухається відносно навколишнього середовища, теплоносія. Механізм досягнення максимальної ефективності тепломасообмінних процесів полягає в створенні розвинутої поверхні зіткнення взаємодіючих середовищ, що можливо тільки в результаті інтенсивного розпилювання теплоносія в реактивному просторі контактної камери [6, 7].

Висновки і напрями подальших досліджень. Рішенням наукової проблеми розробки методики розрахунку тепломасообміну в конденсаційно-охолоджувальному пристрої установки, системи, пристрою з теплоутилізатором на базі "форсункових камер", що наведено в даній пуб-

лікації є: розглянуто тепломасообмін на макрорівні; вивчено можливості одержання розрахункових залежностей з урахуванням найбільшої кількості факторів що впливають на тепломасообмінні процеси; встановлені співвідношення, що найбільше повно виражають картину процесів, що протікають.

Вказаний підхід до проблеми створення методики розрахунків тепломасообміну в контактному апараті, як відомо, дозволяє підвищити загальну ефективність теплоенергетичних установок, теплових схем систем, пристроїв, установок утилізації тепла.

Список літератури

1. Суртаєв В.В. Високотемпературні некаталітичні нейтралізатори вихлопних газів ДВЗ – ефективний спосіб боротьби з автомобільними забрудненнями / В зб. Розвиток промисловості та суспільства // Матеріали конференції. Том 1.- Кривий Ріг, 2016. – С. 188.
2. Деклараційний патент України №58925А. Пристрій для знешкодження шкідливих викидів двигунів внутрішнього згоряння. /Суртаєв В.В., Суртаєв В. М. Бюл.№ 8.- 15.08.2003.
3. Деклараційний патент України №49452А. Пристрій для знешкодження шкідливих викидів автомобільних двигунів внутрішнього згоряння./ Суртаєв В.В., Суртаєв В.М. Бюл.№ 9.- 16.09.2002.
4. Суртаєв В.В. Методичні вказівки до виконання практичних робіт з дисципліни «Нагнітачі і теплові двигуни» для студентів спеціальності 6.050601 – теплоенергетика усіх форм навчання /Видавничий центр ДВНЗ «Криворізький національний університет» КНУ. - Кривий Ріг. - 2015, 56 с., Р № 681.
5. Деклараційний патент на корисну модель №10948. Система сухого подрібнення матеріалів./ Суртаєв В.В., Суртаєв В.М., Ведута М.М., Осадчук Ю.Г. Бюл.№ 12.- 15.12.2005.
- 6 Підвищення ефективності утилізації теплоти при мокрому гасінні коксу. /Дисертація на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук., Суртаєва В.В. за спеціальністю 05.14.06. - «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. 2008.
7. Суртаєв В.В. Методичні вказівки до виконання самостійних робіт з дисципліни «Джерела тепло енергопостачання промислових підприємств» для студентів спеціальності 6.050601 – Теплоенергетика усіх форм навчання /Видавничий центр ДВНЗ «Криворізький національний університет» КНУ. - Кривий Ріг. - 2016, 9 с., Р № 175.
8. Суртаєв В.В. Практикум з дисципліни «Системи виробництва і розподілу енергоносіїв» для студентів напряму підготовки 6.050601 «Теплоенергетика» всіх форм навчання /Видавничий центр ДВНЗ «Криворізький національний університет» КНУ. - Кривий Ріг. - 2016, 16 с., Р № 165. 9. Суртаєв В.В. Методичні вказівки до виконання самостійних робіт з дисципліни «Системи виробництва і розподілу енергоносіїв» для студентів спеціальності 6.050601– Теплоенергетика усіх форм навчання /Видавничий центр ДВНЗ «Криворізький національний університет» КНУ. - Кривий Ріг. - 2016, 9 с., Р № 176.
10. Суртаєв В.В. Практикум з дисципліни «Надійність теплоенергетичних систем» для студентів спеціальності 7.05060101, 8.05060101 «Теплоенергетика» всіх форм навчання /Видавничий центр ДВНЗ «Криворізький національний університет» КНУ. - Кривий Ріг. - 2016, 19 с., Р № 83.
- 11.Суртаєв В.В. Методичні вказівки до виконання самостійних робіт з дисципліни «Надійність теплоенергетичних систем» для студентів спеціальності 7.05060101, 8.05060101– Теплоенергетика усіх форм навчання /Видавничий центр ДВНЗ «Криворізький національний університет» КНУ. - Кривий Ріг. - 2016, 8 с., Р № 17

Рукопис подано до редакції 25.03.2021

УДК 622.013: 622.012.2

Б.М. АНДРЕЄВ, д-р техн. наук, проф., Д.В. БРОВКО, д-р техн. наук, доц.,

В.В. ХВОРОСТ, В.В. КОНОНЕНКО, кандидати техн. наук, доценти

Криворізький національний університет

О.В. РОМАНЕНКО, д-р техн. наук, проф.

ПАТ «Інгулецький гірничо-збагачувальний комбінат»

ОБГРУНТУВАННЯ РІЧНОЇ ПРОДУКТИВНОСТІ ВІДПРАЦЮВАННЯ ЗАПАСІВ ВАСІНОВСЬКОГО РОДОВИЩА

Мета. Виробництво залізної руди в світі протягом останніх років постійно зростає в зв'язку з ростом попиту, при цьому спостерігається тенденція до посилення концентрації виробництва. На тлі закриття дрібних рудників, великі виробництва розширили свої потужності. Огляд і аналіз сучасного світового досвіду будівництва і експлуатації шахт на крутопадаючих родовищах міцних руд дозволяє говорити про ряд характерних тенденцій у розвитку геотехнологій, які без сумніву можуть бути перенесені і адаптовані для гірничо-геологічних умов Васіновського родовища.

Методи дослідження. При вирішенні поставленої задачі використовуються сучасні програмні комплекси для моделювання розвитку запроєктованих рішень, з урахуванням взаємодій та явищ. Вони відрізняються способами завдання вихідних параметрів, та мають свої певні інструменти для аналізу отриманих результатів.