

Формування криогенного обробного струменя безкамерними засобами з кільцевим соплом

Formation of the cryogenic cutting flow by a cylinder nozzle without certain cases

*О.Ф. Саленко, д-р техн. наук, Г.В. Габузьян, В.В. Ткачук, В.Т. Щетинін, канд. техн. наук
Кременчуцький національний університет ім. М. Остроградського, Кременчук, Україна*

Мета. Розглянуто процес обробки водокрижаним струменем є перспективним напрямком розвитку струминних технологій. Нині з цією метою використовуються системи, побудовані за класичною схемою формування крижаної фази криогенної рідини, що потрапляє до змішувальної камери. Далі утворений потік формується калібруючою трубою. Обґрунтувати доцільність застосування безкамерних систем з кільцевими струминними соплами для підведення криогенної рідини.

Метод дослідження. Для вирішення поставлених завдань розроблено оригінальні методи дослідження кільцевих сопел, які базуються на застосуванні малопотужних лазерів, що дозволило встановити режими течії рідини, використовуючи також класичні основи моделювання течії рідини у каналах і теплообміну між контактуючими середовищами.

Результат дослідження. Показано, що застосування безкамерних засобів дозволяє покращити генерацію крижинок, отримати більшу фракцію частинок, що підвищує ефективність обробки. Наведено порівняння фракційного складу крижаних мікрочастинок, оцінено ріжучу здатність струменя. Показано, що даний спосіб генерації доцільний для процесів водоструминного очищення поверхонь, а також для обробки матеріалів (в тому числі, розрізання) при використанні масок. Встановлено раціональні параметри запропонованої системи для отримання максимальної кількості часток крижинок, показано залежність обсягу одержуваних крижинок і їх здатність до різання у течії рідини на зрізі кільцевого сопла, а також умовами витікання робочої рідини з основного (водяного) сопла.

Заключення. Запропонована конструкція дозволяє легко змінювати геометричні параметри частинок, що генеруються, завдяки застосуванню оригінальної конструкції щілинного золотника, а відсутність калібрувальної трубки підвищує ефективність використання струменя для зазначених вище операцій. Отримано фрактограми генерованих крижаних частинок, встановлено функціональні залежності їх розмірів від параметрами течії та умовами взаємодії потоків.

Ключові слова: водокрижане різання, системи кригогенерації, кільцеві сопла, теплообмін у криогенному потоці, струменеві методи обробки.

Вступ

Гідроабразивне оброблення різних матеріалів, у тому числі, конструкційних та високоміцних, є перспективним та прогресивним способом формоутворення. Перевагою таких технологій є те, що вони мають широкі технологічні можливості, струмінь рідини постає ідеалізованим точковим інструментом або інструментом інтегральної дії, який при зміні умов його формування, здатний здійснювати вибірковий керований вплив на оброблювані заготовки, формуючи поверхневий шар або створюючи нові поверхні. Нині існує значна кількість методів струминного оброблення [1], низка робіт також свідчить про доцільність гібридизації цих методів, зокрема, [2].

Насичення струменя абразивними домішками значно підвищує продуктивність процесу, оскільки превалюючими у цьому випадку постають процеси деформаційного зйому та мікрорізання матеріалу, у той час як обробка чистим струменем рідини базується лише на спроможності струминного потоку створювати локальні високоградієнтні гідродинамічні напруження.

Цікавим напрямком подальшого розвитку струминних технологій є використання водокрижаних потоків, сформованих струминним та криогенним потоками. Роботи, присвячені дослідженню процесів водокрижаного різання, зокрема, [3,4] зазначають, що внаслідок злиття двох потоків — рідинного, перебіг якого відбувається крізь сопловий насадок, та криогенного (наприклад, рідкого азоту, що надходить до змішувальної камери через дроселюючу шайбу), відбувається формування потоку дрібних крижинок, які розганяються водою, та набуваючи кінетичну енергію,

прямують до поверхні, де і здійснюють роботу руйнування. У роботі [5] зазначається, що ефективність водокрижаного різання є вищою порівняно із струминним, хоча і меншою за гідроабразивний спосіб розкרוу.

Постановка проблеми

Відтак очевидно, що водокрижане різання є ефективним для операцій різання низькоміцних матеріалів, очищення поверхонь, розрізання замороженого м'яса риби та іншої сировини. Безсумнівною перевагою водокрижаного різання є відсутність проблем, пов'язаних із забезпеченням абразивом та необхідністю утилізації використаних абразивів і шламів після обробки. Водночас раціональні параметри криогенеруючої системи, як і режими ведення обробки, встановлені лише наближено, що робить задачу підвищення різальної здатності водокрижаного струменя актуальною і значимою.

Теоретичне обґрунтування гіпотези щодо зміни умов формування водокрижаного струменя безкамерними засобами з кільцевим соплом здійснювали на основі аналізу формування потоку при перебігу кільцевим каналом та умов змішування струменя в точці змикання потоку, в тому числі, і з використанням програмного середовища *FlowVision* (твердотільні моделі протокової частини були генеровані в *SolidWorks*), розподіл швидкостей і умов формування струменя перевіряли експериментально за допомогою низькопотужного лазера.

Мета роботи — встановлення закономірностей формування водокрижаного потоку безкамерними засобами із кільцевим соплом.

Методика проведення досліджень

Традиційно водокрижана система будується за тим же принципом, як і гідро абразивна (рисунок 1) [6]. Така система має струминне сопло, змішувальну камеру, до якої надходить криогенна рідина, та калібрувальну трубку, яка, власне, і формує водокрижаний струмінь. Робоча рідина високого тиску з надзвуковою швидкістю спливає з сопла 5. Перебіг через змішувальну камеру 3 струмля рідини 4 створює розрідження і охолоджується рідким азотом, що потрапляє до камери через штуцер 6. Виконавши охолодження, азот активно випаровується, внаслідок чого в камері зростає тиск. Протягом перебігу до каналу 2 калібрувальної трубки 1 частинки води перетворюються на крижинки, і до каналу надходять вже мікрокрижинки, які розганяються водяним потоком і формують ріжучий струмінь. Застосування морфологічного аналізу [7] доводить, що така конструкція не є єдиною і раціональною: для зміни умов взаємодії струминного потоку із обробною поверхнею конструкція і принцип формування струменя може бути зміненим.

Проведені нами дослідження формування потоків кільцевими соплами для здійснення операцій лазерно-струминної обробки засвідчили можливість застосування подібних технічних рішень і для формування криогенного струменя, причому в такій системі теплообмін здійснюватиметься виключно без змішувальної камери.

Відсутність змішувальної камери та калібрувальної трубки дозволяє зменшити відстань від зрізу сопла до обробної поверхні, отже, можна очікувати підвищення ефективності обробки водокрижаним струменем.

Процес формування крижинок та їх взаємодія зі струменем води надзвичайно складний. Це обумовлюється наступними аспектами: розподіл швидкостей потоку в різних точках поперечного перетину струменя нерівномірний, за довжиною струменя характер розподілу швидкостей у перетині змінюється з виокремленням так званого ядра (рисунок 1), з віддаленням від сопла компактність струменя порушується: вона губить свою початкову циліндричну форму та поступово переходить у потік дрібних крапель, при русі крижинок уздовж калібрувального каналу вони постійно ударяються між собою та об стінку каналу. Раніше проведеними дослідженнями встановлено [8], що точка введення потоку криогенної рідини безпосередньо визначає не тільки обсяг згенерованих крижинок, а і їхні розміри. Також було показано, що саме крижинки середньовеликі та великі (фракцією понад 0,22 мм) виконують роботу руйнування

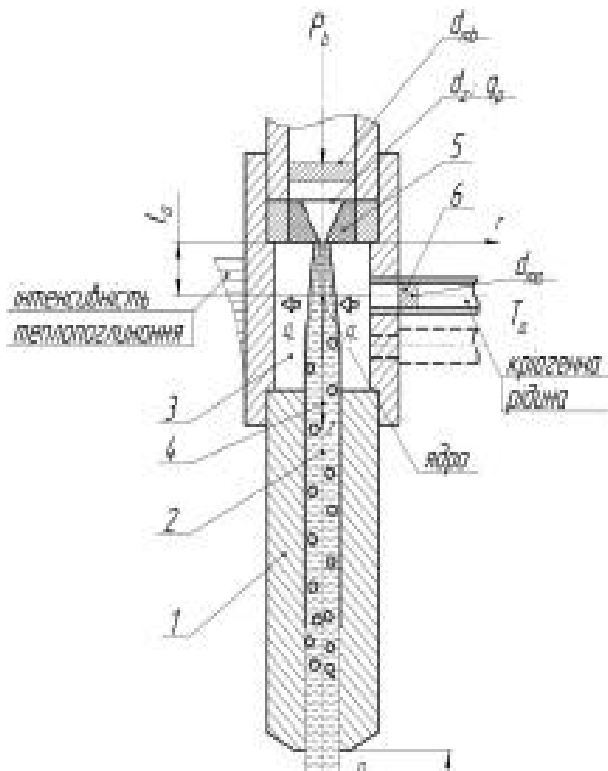


Рисунок 1 — Утворення різального водокрижаного струменя традиційними засобами

максимально продуктивно. Пляма взаємодії водокрижаного потоку з оброблюваною поверхнею визначається зрізом калібрувальної трубки.

Однак досить часто існує необхідність зміни форми плями контакту, зокрема, у тих випадках, коли потрібно виконати очищення поверхні [9] (у цьому випадку пляма має бути якомога більшою, але мати достатній запас кінетичної енергії, щоб виконувати роботу руйнування забруднення, або коли різання виконується із щільною маскою [10], тобто за умови, що форма струменя наблизитиметься до форми отвору маски.

З цієї точки зору, перспективною є система формування струменя для лазерно-струминного різання, висвітлена в [11], однак формування потоку має здійснюватися струминним соплом, що перебігає уздовж центральної осі, а кільцеве охоплююче сопло призначене для відведення криогенної рідини.

Така система дозволяє використовувати струмене-формуєчі елементи із більшим діаметром, а відсутність калібрувальної трубки, змішувальної камери дозволяє скоротити відстань між зрізом струминного сопла і оброблюваною поверхнею, розширює можливості зміни форми плями взаємодії та умови генерації крижинок за рахунок використання принципу багатоточковості підведення криогенної рідини (азоту).

Зміна кількості точок підведення рідини при рівній загальній витраті Q_v та постійному тиску p_v дозволяє змінювати умови витікання струменя із кільцевого сопла, з відповідною зміною Re , отримувати не тільки різні умови генерації крижинок, а і потрібні геометричні розміри плями на оброблюваній поверхні.

Для зміни Re у протоковій частині насадку запропоновано використовувати щільний золотник кільцевого типу, що дозволяє підводити рідину з одного, двох, трьох, чотирьох, п'яти чи шести каналів. В залежності від схеми підведення забезпечується вихровий чи близький до ламінарного режим течії рідини.

Розроблену модель показано на рисунку 2.

В основу розробленої моделі головки покладено принцип використання кільцевого сопла [12], що складається з внутрішньої 4 частини протокового каналу та зовнішньої частини сопла 5. Особливістю даної системи

є наявність засобу зміни режиму течії рідини, збудованому за принципом щільного золотника кільцевого типу [11], що складається з зовнішньої обійми 2 та внутрішньої 3. Даний механізм дозволяє регулювати кількість рідини, що витікає з сопла та впливати на умови формування потоку. За допомогою рукоятки для регулювання потоку, яка знаходиться на шайбі щільного золотника 2, канали підведення рідини можуть бути комутовані відповідним чином. При подачі рідини до кільцевого сопла обирається один із шести варіантів комутації.

Можна очікувати, що використання одного каналу дозволяє створювати закручування рідини та формування вихрового потоку, при якому краплини рідкого азоту формують більш крупні крижинки. Використання двох, трьох, чотирьох, п'яти чи шести каналів зменшує несталість потоку та наближає його до ламінарного. Зазначений пристрій зафіксований шайбою 6 та монтується до соплового пристрою корпусом 1.

Лазерну систему дослідження потоку рідини, сформованого кільцевими соплами, зображено на рисунку 3.

Пристрій складається з базового елементу 1, на якому за допомогою механізму вертикального переміщення 2 змонтований низькопотужний лазер ОКГ 3, на вихідному кінці якого співвісно закріплений пристрій для встановлення струминно-лазерної головки 4, рідина до якої надходить патрубком підведення рідини 5, в якому можуть встановлюватися засоби для ламінаризації потоку (детурбулізатори), і в якому, з протилежного до оптичної системи ОКГ, змонтований сопловий пристрій 6. Цей пристрій має профільний калібрувальний канал, що формує робочий потік рідини з введеним лазерним променем. Рухаючись крізь сопловий насадок, потік потрапляє на прозору опорну поверхню робочої ванни 7. Змонтоване під робочою ванною 7 дзеркало 8 спрямовує пляму розтікання на фотофіксуючий пристрій з фотоматрицею (фотоапарат зі світлофільтром С-4) 9, змонтований на перпендикулярній оптичній осі за допомогою кронштейна 10.

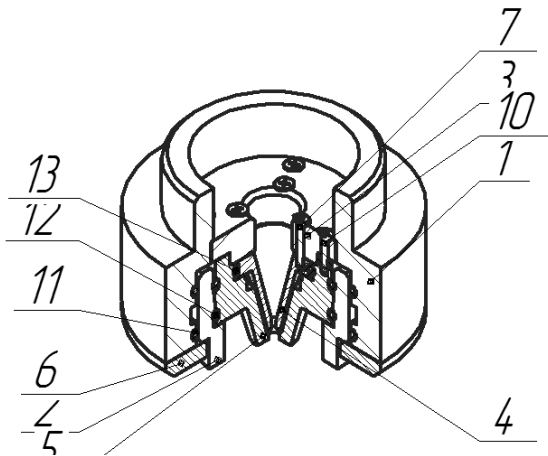


Рисунок 2 — Твердотільна модель головки для формування водокрижаного потоку безкамерними засобами з кільцевим соплом:

- 1 — корпус, 2 — шайба щільного золотника із засобом регулювання, 3 — вкладник щільного золотника, 4 — внутрішній конус сопла,
- 5 — зовнішній конус сопла, 6 — шайба фіксуюча, 7 — фіксатор золотника, 10 — проміжна шайба, 11, 12, 13 — уцільнення

Пристрій також дозволяє:

- визначати витратні характеристики використовуваних сопел для розрахунку числа Рейнольдса, використовувати насадки з різними конфігураціями профілю каналу і, відповідно, коефіцієнтами витрати рідини μ ,
- формувати перерізи струменя кільцевими соплами заданого перетину, достатніми для спостереження без застосування спеціальної оптичної системи та збільшеної апаратури,
- змінювати висоту струменя — параметр l_s , а також регулювати точку введення сфокусованого лазерного випромінювання за відстанню l_0 ,
- вести візуальний контроль і фіксацію конфігурації струменя та його відбитка, з використанням реєструючої фототехніки.

Імітаційна установка реалізована за принципом подібності, що дозволило проводити зняття картин розподілу випромінювання при витіканні рідини з сопел з великим діаметром на зрізі (близько 2,0 мм).

Соплові насадки конструктивно виконували такими, щоб вхідна ділянка отвору забезпечувала компенсацію неспіввідності Δd_c променя лазера та сформованого струменя рідини, а також забезпечувала повне відбиття променя лазера за рахунок відсутності його максимального відбиття на межі середовищ (рідина — повітря) при введенні у засопловий простір кільцевого каналу діаметром d_p .

Елементи соплового пристрою виготовлено методом прототипування [13] з використанням технології SLS (*Selective Laser Sintering* — лазерне спікання порошкових матеріалів).

Для кількісної оцінки нерівномірності розподілу швидкостей у каналі підведення запропоновано скористатися коефіцієнтом нерівномірності потоку k_v :

$$k_v = \frac{\sum \frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{\max}}}{n_{\max}}, \quad (1)$$

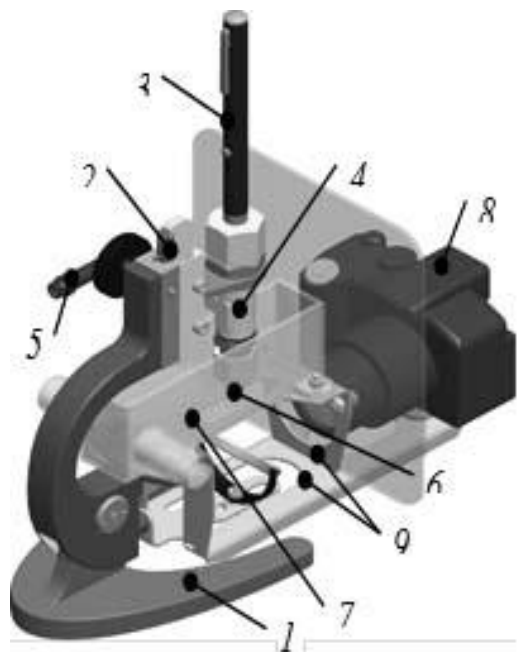


Рисунок 3 — 3D модель дослідницького пристрою:

- 1 — основа, 2 — механізм вертикального переміщення насадки, 3 — джерело лазерного випромінювання, 4 — камера коаксіального введення променя лазера в струмінь рідини, 5 — трубка підведення рідини, 6 — насадок з профільним калібрувальним каналом, 7 — робоча ванна, 8 — фотоапарат для фіксації розподілу променя у відображенні на мішені у ванні, 9 — кронштейн

де n — кількість каналів підведення рідини ($n_{\max} = 6$), V_{\max} та V_{\min} — максимальної та мінімальної швидкостей, які виміряно за протилежно розташованими каналами проти годинникової стрілки.

Для зняття характеристик розподілу випромінювання у потоці та визначення величин I_{\max} та I_{\min} створено вимірювальний комплекс, здатний фіксувати і вимірювати просторовий розподіл випромінювання за перерізом. Для підвищення точності вимірювань у системі подачі рідини було встановлено еспанзомат AQUAPRESS AFC24SBA. З огляду на можливі перепади упродовж вимірювань з метою фіксації результатів вимірювань використовували АЦП m-DAQ.

У дослідженнях відстань від торця насадка до робочої поверхні змінювалася у діапазоні від 0 до 48 мм з кроком 1,0 мм (додаткова відстань від робочої поверхні фоторезистора до насадка — 8 + 1 мм), тиск рідини перед робочою камерою — 0,05 МПа. Для зручності візуалізації в установці використовувалося джерело лазерного випромінювання низької потужності BGP-3010.

У ролі джерела лазерного випромінювання застосовано твердотільний лазер з діодним накачуванням (*Diode Pumped Solid State Laser*).

Лазерний промінь фокусується і подається на Nd:YVO4 (ванадат ітрію (YVO4) з неодимовим легіруванням (Nd: YVO)) — кристал, який з 808 нм променя збільшує 1064 нм промінь. Потім КТР кристалом (кристал титаніл-фосфату калію, KTiOPO4, (КТР)), з 1064 нм створює промінь подвійної частоти — 532 нм.

Оскільки розподіл випромінювання, як було припущено раніше, залежить від параметрів струминного потоку, і, зокрема, обумовлюється числом Рейнольдса, розроблено методику визначення Re при знятті характеристик струминного потоку, сформованого профільованим соплом.

Так, відповідно до [14], число Рейнольдса для соплового каналу визначиться як

$$Re = vR / \nu,$$

де v — середня швидкість руху рідини в трубопроводі або в каналі, R — гідравлічний радіус, ν — кінематична в'язкість рідини.

При цьому для сопел складного поперечного перерізу, в тому числі, кільцевих, критичне значення Re становитиме до 1000–1500. Розподіл швидкостей за перерізом каналу становить

$$u = \frac{1}{4} \cdot \frac{ig}{\nu} (r_0^2 - r^2), \text{ або після перетворень: } u = \frac{gir_0^2}{4\nu} \left(1 - \frac{r^2}{r_0^2}\right) \quad (2)$$

де g — прискорення вільного падіння, i — п'єзометричний уклон, r_0 — радіус трубопроводу.

Отримане рівняння є рівнянням параболи

$$u_{\max} = \frac{igd_0^2}{16\nu},$$

де d_0 — діаметр трубопроводу підведення рідини. Витрата рідини через сопло становить:

$$Q = \mu\omega \sqrt{2 \frac{\Delta p}{\rho}},$$

де Δp — перепад тиску в соплі, що при витіканні в атмосферу дорівнює p_b , усереднена швидкість руху рідини у засопловому просторі становитиме

$$v = \mu \sqrt{2 \frac{\Delta p}{\rho}}, \text{ тоді } Re = \frac{\mu R}{\nu} \sqrt{2 \frac{\Delta p}{\rho}}.$$

Таким чином, вимірявши тиск у досопловій магістралі, визначивши в'язкість рідини та гідравлічний радіус сопла як $R=d_0/4$ та коефіцієнт його витрати як

$$\mu = \frac{Q_s}{\omega_s \sqrt{2 \frac{p_s}{\rho}}},$$

розраховують Re , який безпосередньо визначатиме обсяг та геометричні розміри генерованих крижинок.

Матеріал досліджень

Відомо, що витрата рідини із водяного сопла становить

$$q = \mu f_d \sqrt{2(p_a - p_k) / \rho}$$

де p_a, p_k — тиск на вході і на виході до кільцевого сопла, ρ — густина рідини, μ — витрата рідини і визначається площею перетину на зрізі сопла f_d .

Підведення рідкого азоту від термоса здійснюється у регульоване кільцеве сопло. Оскільки нами застосовано кільцеве сопло із двома конічними співвісними трубками, для визначення розподілу швидкостей у потоці каналу, що змикається, скористаємося наступними міркуваннями. Течія в'язкої рідини прохідним перетином каналу з віссю z за

умови $u \frac{\partial u}{\partial x} \approx 0$ описується рівнянням

$$-\frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r_i} \frac{\partial}{\partial r_i} \left(r_i \frac{\partial u_x}{\partial r_i} \right) + \frac{1}{r_i} \frac{\partial^2 u_x}{\partial \theta^2} = 0$$

При цьому витрата рідини на вході визначиться як

$$Q = \frac{\pi}{8\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \left[b^4 - a^4 - \frac{(b^2 - a^2)^2}{\ln(b/a)} \right]$$

Тоді, за умови нерозривності потоку $q = Q$, і, відповідно, швидкість перебігу рідини становитиме

$$u = \frac{\pi}{2\mu(b^2 - a^2)} \frac{\partial p}{\partial x} \left[b^4 - a^4 - \frac{(b^2 - a^2)^2}{\ln(b/a)} \right]. \quad (4)$$

На вході у камеру подача рідкого азоту може здійснюватися одним або кількома каналами одночасно. Залежно від способу підведення рідини змінюватиметься режим руху, і у випадку несиметричності підведення відбуватиметься закручування потоку. При цьому режим течії змінюватиметься, відтак, змінюватиметься і фракційність генерованої криги та геометричні параметри умов потрапляння потоку на оброблювану поверхню.

Рух рідкого азоту в тангенціальному напрямі у камері перед каналом конічного сопла можна описати [15]

$$\rho w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} + \rho w_r \frac{\partial w_r}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\tau r)}{\partial r}; \quad (5)$$

$$\frac{\partial p}{\partial r_0} = \rho \frac{\partial w_x^2}{\partial x}; \quad \frac{\partial(w_x r_0)}{\partial x} + \frac{\partial(w_x r_0)}{\partial r_0} = 0,$$

де w_x, w_r — швидкості руху рідини у радіальному та осьовому напрямках, ρ — густина рідкого азоту.

Тоді за умови обергально-поступового руху при несиметричному підведенні рідкого азоту розподіл дотичних напружень в зоні турбулентності на основі гіпотези Прандтля може бути описаний за формулою

$$\tau_\varphi = \rho l_\varphi^2 \left[\frac{1}{r} \frac{\partial(w_\varphi r)}{\partial r} \right]^2, \quad (6)$$

а відносний коефіцієнт тертя залежно від кута φ_w закручування потоку змінюватиметься наступним чином:

$$\psi = \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\cos \varphi_w} - 1 \right)^{4/3}}}{\cos \varphi_w},$$

де l_φ — довжина шляху прямування, у першому наближенні відстань до кінця каналу.

За відповідними напрямками r та x коефіцієнти тертя c_x та c_r становлять

$$c_i = 0,0256 \frac{1}{\text{Re}_i''} \quad \text{причому} \quad \text{Re}_i'' = \frac{w_i \delta_i}{\nu}.$$

Отже на основі [15] інтегральне співвідношення, що пов'язує режими руху рідини у камері перед конічним соплом із умовами підведення рідини, після інтегрування (5) матиме вигляд

$$\begin{aligned} \frac{d \text{Re}_x''}{dx} &= \frac{c_{fx}}{2} R w_0 - (1+H) \frac{\text{Re}_x''}{w_0} \frac{dw_0}{dx} + \\ &+ \left(1 - \frac{\delta_x}{2r_0} \right) \frac{R}{2} \frac{\delta_x}{r_0} \frac{1}{w_0} \frac{dw_0}{dx} \end{aligned} \quad (7)$$

Це означає, що товщина граничного шару, розподіл швидкостей і тисків у потоці конічного кільцевого сопла визначатимуться умовами закручування потоку внаслідок кількаканального потрапляння рідкого азоту до сопла.

За умови тиску на вільній поверхні термосу із рідкими азотом, дорівнюючому атмосферному p_a , витрата азоту становитиме:

$$q = \mu f_d \sqrt{2(p_a - p_k) / \rho} \quad (8)$$

тоді $dm_a = q dt = \mu f_d dt \sqrt{2(p_a - p_k) / \rho}$, що призведе до незначного уповільнення потоку.

Таким чином, число Рейнольдса Re безпосередньо визначатиме розміри та кількість крижинок, отримуваних після сполучення рідинного струменя, який витікає із центрального сопла, із рідкими азотом, що спливає із конічного кільцевого сопла.

Теплообмін відбувається при змішуванні потоків, за рахунок активного переміщення рідин між собою. Потік рідини вважаємо однорідним тільки у ядрі струменя, на ділянках біля периферії — потік дискретної фази (рух окремих крапель).

При перебігу рідини має місце нестационарна теплопровідність, яку в першому наближенні можна описати відповідним рівнянням

$$\frac{\partial T_h}{\partial \tau} = \alpha L(T_h) + f(\Delta T_h), \quad (9)$$

де $\alpha = \frac{\lambda_h}{c_h \rho_h}$, $f(\Delta T_h) = \frac{q_+ - q_-(\Delta T_h)}{\delta_a c_h \rho_h}$, $L = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{1}{r_z} \frac{\partial}{\partial r}$, T_h — температура води при проході крізь сопло, ΔT_h — температурний напор, λ_h — коефіцієнт теплопровідності, c_h — теплоємність, ρ_h — густина, δ_h — товщина, x — координата поздовж поверхні контакту потоків рідин. Інтенсивність тепловідведення q моделювали за рекомендаціями [16], при моделюванні теплопоглинання враховували, що вода, охолоджуючись від початкової температури T_h при перебігу із сопла, змінювала свій агрегатний стан при $T_i = 0$ °C і далі крижинки охолоджувалися до температури T_k .

Повну енергію аналізованої системи з урахування змінного теплового балансу змішування внаслідок вивільнення енергії (теплоти) кристалізації, визначали на основі результатів, отриманих [17]

$$\begin{aligned} & (1 - \alpha) \left(T \frac{dC_p}{dx} + C_p \frac{dT}{dx} + V \frac{dV}{dx} \right) + \\ & \alpha \left(\left[\sum_{i=1}^N C_i g_i \frac{dT_i}{dx} \right] + \left[\sum_{i=1}^N T_i g_i \frac{dC_i}{dx} \right] - 3\alpha q \sum_{i=1}^N \xi_i^2 \frac{d\xi_i}{dx} \right) + \\ & \alpha \sum_{i=1}^N V_i \frac{dV_i}{dx} = T_0 \left[(1 - \alpha) \frac{dC_p}{dx} + \alpha \frac{dC_i}{dx} \right] \end{aligned} \quad (10)$$

де α , g_i — загальна масова доля фракцій та доля i -х (за масою) фракцій у сумарній масі дискретної (крижаної) фази у потоці, T , V , T_i , V_i — значення температури та швидкості газу та i -ї частинки криги, відповідно, q , ξ_i — прихована теплота зміни фазового стану речовини дискретної фази та плинне значення ступеня кристалізації i -ї фракції, T_0 — критична температура гальмування газу [°C], C_p , C_i — значення питомої теплоємності газової та i -ї дискретної фаз відповідно.

На відміну від змішування крапель в системі із змішувальною камерою і калібрувальною трубкою введення рідкого азоту до потоку в оболонкову частину не змінює швидкість руху частинок, отже, можемо вважати, що епора розподілу швидкостей по потоку відповідає розподілу вільного потоку.

Можливість керування процесом кригогенерації проілюстровано моделюванням потоку в кільцевому соплі. Було оцінено розподіл швидкостей у площині, перпендикулярній осі струменя, та у площині цієї осі. Моделювання руху потоку виконували з такими режимами: швидкість потоку в каналі — 20 м/с, тиск рідини на вході до протокової частини сопла — 0,5 МПа, витрата рідини — 0,3 дм³/с, діаметр каналу підведення — 2,5 мм, форма отвору сопла — коло, розмір щілини каналу — 0,2 мм, тиск на виході сопла — 0,1 МПа.

Отримані результати

Значення числа Re змінювалося у межах 900—2800. Це досягалося як зміною витрати рідкого азоту на вході до кільцевого сопла, так і зміною кількості каналів підведення рідини.

Наявність одного каналу підведення спричиняє значне викривлення форми струменя (рисунок 4, таблиця 1). Непарна кількість каналів, а саме, що дорівнює трьом, п'яти, також призводить до викривлення форм струменя, водночас

парна кількість каналів (два, чотири, шість) забезпечує симетричність потоку. В результаті можна стверджувати, що розташування каналів істотно впливає на компактність струменя, особливо для сопел, зріз яких має форму відмінну від кола.

Результати аналізу зміни числа Рейнольдса залежно від умов підведення рідини показано на діаграмі рисунка 5.

Так, очевидно, що мінімальні зміни цього параметру відповідають симетричному шестиканальному підведенню рідини, а максимальні — як і на рисунку 4 — одноканальному несиметричному. Саме у цьому випадку вдалося досягти максимального значення $Re = 2750$ при витраті рідкого азоту до $2,9 \text{ дм}^3/\text{хв}$.

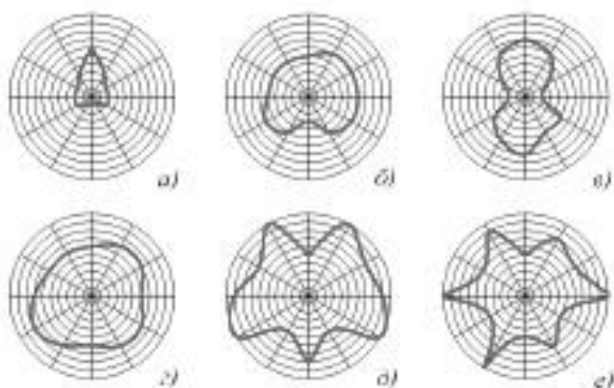


Рисунок 4 — Кругова діаграма розподілу швидкостей в аналізованому перетині при одному (а), двох (б), трьох (в), чотирьох (г), п'яти (д) і шести (е) каналах підведення рідини

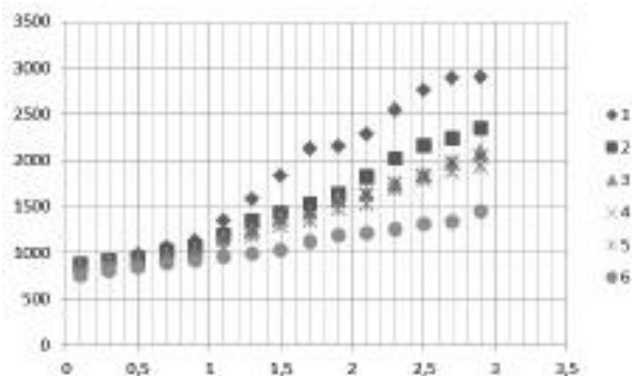


Рисунок 5 — Зміна числа Re при зміні витрати рідкого азоту q при підведенні в кільцеве сопло різною кількістю каналів — від 1 до 6

Проведене також співставлення експериментально визначених чисел Re з розрахунковими, представленими на рисунку 5. Було встановлено, що відмінність розрахункових значень і виміряних за допомогою описаного вище пристрою становить біля 18% на малих значеннях та до 12–15% на високих. Водночас виміри не можуть бути віднесені до однієї генеральної сукупності, що свідчить про наявність істотного впливу кількості каналів на режим течії рідини у кільцевому соплі. Такий розкид параметрів пояснюється тим, що протокові канали, сформовані засобами SLS відтворення деталей, є гідравлічно шорсткими. Отже, товщина граничного шару може бути більшою за очікувану, відповідно, має більший вплив на Re . З іншого боку, в'язкість рідкого азоту суттєво залежить від температури, яку виміряти при прямуванні каналами сопла достатньо важко. Вставлено також і нерівномірність швидкостей потоку після його перебігу із соплової насадки.

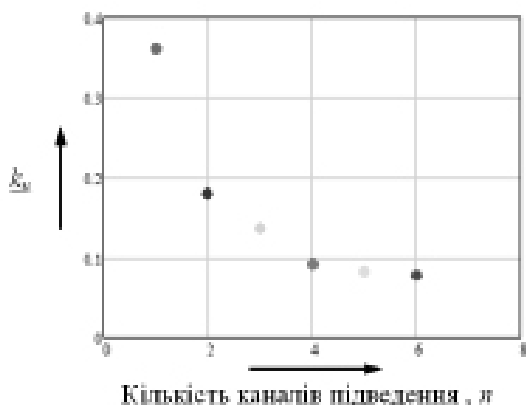


Рисунок 6 — Залежність коефіцієнта нерівномірності полів швидкостей від кількості каналів підведення рідини

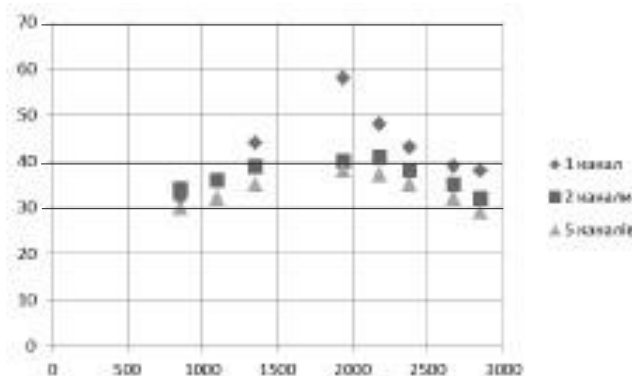









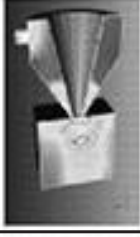
















Рисунок 7 — Зміна частки (y %) крижинок середньо-великого і великого розмірів, виконуючих максимальну роботу мікрорізання, залежно від Re

Показано, що нерівномірність потоку суттєво залежить і від віддаленості точки підведення рідини до кільцевого зрізу сопла і максимально проявляється при несиметричному (одноканальному) підведенні рідини (рисунку 6).

Фракційний аналіз крижинок наведено у таблиці 2. Умовно їх поділено на 5 фракцій: дрібні неправильної форми (до $0,1 \text{ мм}$), дрібні правильної форми (форма наближена до правильного багатокутника, до $0,15 \text{ мм}$), середні ($0,22 \text{ мм}$), середньо-великі $0,3 \text{ мм}$) та великі ($0,4$ та більше мм).

Таблиця 1 – Моделювання течії рідини

Кількість каналів підведення рідини	Векторне відображення швидкості	Залівка швидкості в кольорі	Залівка в кольорі модуля швидкості горизонтального перетину	Векторне поле швидкостей в кільцевому соплі
1 канал підведення рідини				
2 канали підведення рідини				
3 канали підведення рідини				
4 канали підведення рідини				
5 каналів підведення рідини				
6 каналів підведення рідини				

Встановлено, що при введенні рідкого азоту в обсязі, меншому ніж 10% від витрати рідини (води), крижинки формуються гострокутної геометричної форми. Температура на виході з калібрувальної трубки не вища за $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рисунок 4, а), розміри фракцій становлять $0,09\text{--}0,25\text{ мм}$, з середньою масою до $0,007\text{ г}$. Збільшення витрати рідкого азоту призводить до лінійного зростання маси криги, що в цілому практично повністю збігається з результатами розрахунку маси генерованої криги.

Мікроскопічні дослідження та оптичні вимірювання крижинок свідчать, що крижинки мають суттєвий розкид за розмірами (i , відповідно, за масою), а час їх танення при температурі оточуючого середовища становить 0,3—0,6 хв.

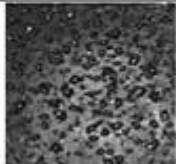
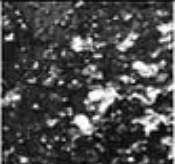
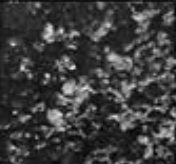

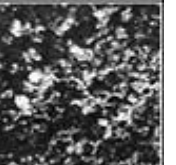
Таким чином, можна зробити висновок, що незважаючи на більшу масу криги, яку можна отримати при збільшенні витрати рідкого азоту, що надходить до кільцевого сопла, форма та розміри крижинок будуть меншими, а їх розгін до швидкостей, при яких крижинки спроможні виконувати роботу мікрорізання, буде менш ефективним.

Зі зміною числа Рейнольдса Re кількість крупних частинок змінюється, причому можна вважати, що існує певний оптимум цього параметра, при якому генеруються частинки максимальної величини, а їх доля сягає 58%. В інших випадках задіяння більшої кількості каналів підведення має менший вплив, і доля частинок максимального розміру знаходиться на рівні 30%.

Визначено також і геометричні параметри зони водокрижаного впливу. Так, установлено, що у міру віддалення від зрізу калібрувальної трубки частинки зберігають досить низьку температуру та різальну здатність на відстані до 50—60 мм. Показано, що на відміну від водокрижаної системи, що традиційно використовується для різання матеріалів, пропонується не дозволяє отримувати довгої струмись, однак має значну площу впливу (таблиця 3).

На відміну від гідроабразивного струменя (з активною частиною до 150—180 мм) водокрижаний струмінь досить активно дисипує в повітряному просторі. Це явище властиве традиційним кодокрижаним системам, і більшою мірою пропонується безкамерній системі.

Таблиця 2 — Результати досліджень фракційного складу крижинок

Згенеровані крижинки	Дрібні правильної форми	Дрібні неправильної форми	Середні	Середньо-великі	Великі
Нормована фракція, мм	0,1	0,15	0,22	0,3	0,4
Середн. розм., мм	0,085	0,115	0,122	0,216	0,321
Дисперсія визнач., мм	0,022	0,024	0,033	0,039	0,042
χ^2 -критерій Пірсона [χ^2]=3,84	2,95*	3,32*	2,86*	3,18*	3,32
Мікро-фото крижинок					

* $\chi^2 < [\chi^2]$ тобто гіпотеза про нормальність розподілу підтверджується.

Таку особливість можна пояснити тим, що крижинки мають меншу масу відносно абразивних частинок, через те володіють меншим запасом кінетичної енергії. Зазначене підтверджується також і аналізом профілю вирви, отриманої при імпульсній дії струменя на поверхню обробки. В таблиці 2 наведено значення глибини борозенки, а також її розміру в перпендикулярному перетині. Аналіз даних свідчить, що при віддаленості понад 30 мм струмінь вже практично не виконує корисної роботи руйнування (заглиблення борозенки не перевищує 0,1 мм, як при дії струменя чистої рідини), а його радіус істотно зростає. Однак пропонується система, у порівнянні із існуючими аналогами, має більшу площу обробки, тому можна припустити, що такі водокрижані головки можна з успіхом застосовувати як для очищення поверхонь від забруднень, так і для роботи із масковими пристроями, що екранують оброблюваний матеріал і дозволяють виконувати роботу руйнування тільки на ділянках, де маска відсутня.

Пропонується система є ефективною з точки зору широких технологічних можливостей пристрою, перш за все, можливістю регулювання потоку засобами зміни формування криогенної оболонки кільцевим соплом. Генерований водокрижаний струмінь найбільш доцільно застосовувати для різання матеріалів незначної (до 10Dk) товщини, обробку потрібно здійснювати з мінімальною відстанню від поверхні — у межах 5—10 мм, міцність матеріалів також повинна бути невисокою.

Таблиця 3—Геометричні параметри водокрижаного струменя та параметри отримуваної вирви для традиційних кріогенних систем та для запропонованої

Відстань, мм	Радіус струменя, мм	Середньоквадратичне відхилення, мм	Глибина борозенки на тестовому зразку, мм	Мікрофото поверхні
Традиційна система				
10	1,12	0,374	2,4	
20	1,18	0,395	2,1	
30	1,19	0,3966	1,2	
40	1,22	0,4067	0,56	
50	1,27	0,443	0,18	
60	1,35	0,45	0,05	
70	1,48	0,493	0	
80	1,8	0,61	0	
Пропонована система				
10	2,3	0,541	1,23	
20	5,8	0,8457	0,49	
30	9,5	0,897	0,18	
40	14,4	0,9978	0,06	
50	19,2	1,254	0	
60	24,7	1,865	0	
70	35,3	2,468	0	

Можна очікувати, що водокрижаний потік суттєво продуктивніше видалятиме поверхневі плівки і шари забруднення, водночас він не несе істотної загрози для металевих високоміцних поверхонь.

Висновки

В результаті проведеного комплексу теоретико-експериментальних досліджень виявлено вплив умов формування водокрижаного струменя безкамерними засобами із кільцевим соплом на його різальну здатність. Показано, що водночас із витратою кріогенної рідини, зокрема, рідкого азоту, важливий вплив на різальну здатність, обумовлену розмірами частинок, має режим течії рідкого азоту, що характеризується числом **Re**. При цьому запропонована конструкція безкамерного пристрою із конічним співвісним соплом дозволяє значно ефективніше формувати крупні крижинки льоду, отже, виконувати роботу руйнування більш продуктивно. Водночас відсутність калібрувальної трубки призводить до того, що струмінь досить інтенсивно втрачає початкові геометричні розміри, збільшується у діаметрі, перетворюючись на багатофазний незв'язаний потік частинок криги, води та газових порожнин.

Також отримано фрактограми генерованого потоку криги та встановлено їх функціональну обумовленість режимами генерації.

Література

1. Тихомиров, Р.А. Гидрообработка — процесс и оборудование / Р.А. Тихомиров. — СТИН №6. — 1997. — с.44—48.
2. Salenko, A. F. Cutting of polycrystalline superhard materials by jet methods / A. F. Salenko, V. T. Shchetinin, G. V. Gabuzyan, V. A. Nikitin, N. V. Novikov, S. A. Klimenko. — Sverkhtverdye Materialy. — 2016. — Vol. 38, No. 5. — P. 80—94.
3. Kiyohashi, H. A study of Production of Ice Particles by the Heat of Vaporization of Cryogenic Liquefied Fuels and Their Applications in Ice Jets / H. Kiyohashi, K. Handa // Proceedings of the International Symposium on New Applications of Waterjet Technology, Ishinomaki, Japan, 1999. — P. 51—60. DOI: 10.1007/978-94-011-5320-1_6

4. Máša, V. Efficient Use of Compressed Air for Dry Ice Blasting / V. Máša, P. Kuba // Journal of Cleaner Production, 2016, vol. 111, part A. — pp. 76—84. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.07.053
5. Brenner, V. Determination of the Criterion of Rock Resistance to Hydro-Mechanical and Hydro-Abrasive Cutting / V. Brenner, R. Powell, H. Louis, A. Pushkarev // Proc. International Symp. on New Applications of Water Jet Technology. 19-21 Oct. 1999. Ishinomaki, Japan. Ishinomaki Senshu University. - p. 399-405.
6. Бурнашов, М.А. Моделирование процесса разрушения покрытия водоледяной струей при очистке деталей машин / М.А. Бурнашов, А.Н. Прежбилов, Ю.В. Василенко // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». — 2017. — Т. 17, № 2. — С. 67—73.
7. Кузнецов, Ю. Н. Применение морфологического анализа для расширения мобильности и сферы использования станков / Ю. Н. Кузнецов, Ж. А. Хамуйела Герра. — Промислова гідравліка і пневматика, 2012. — № 1. — С. 111-114.
8. Саленко, О.Ф. Встановлення раціональних умов формування водо крижаного струменя та визначення його різальних властивостей / О.Ф. Саленко, Г.В. Габузян, В.Т. Щетинін, В.В. Ткачук // Вестник КрНУ им. М.Остроградского, №6. — 2017. — С. 76-84.
9. Стоцько, З.А. Математична модель розподілу маси речовини в струмені розпилення при струменевій обробці поверхонь незв'язаними твердими тілами / З. А. Стоцько, Т. О. Стефанович // Вісник Національного університету «Львівська політехніка»: Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні, 2005. — № 535. — С. 39-44.
10. Salenko, A.F. Support for small cutting of waterjet treating of the SiC-micrarrays / A. F. Salenko, G.V. Gabuzyan, V. A. Nikitin. — Вісник СевНТУ: зб.наук.пр. Вип. 150/2014. Серія: Машино-приладобудування та транспорт. — Севастополь, 2013. — С. 117—122.
11. Холодный, В. Ю. Применение лазерно-струйного метода обработки для перфорирования сотового заполнителя авиационных сэндвич панелей / В. Ю. Холодный // Восточно-Европейский журнал передовых технологий . — Харьков, 2016. — С. 19—30. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.59870
12. Sibailly, O. Laser-Edge Grinding of Thin Wafers with the Water-Jet-Guided Laser / O. Sibailly, F. Wagner, B. Richerzhagen // Future Fab International 16, February 2004.
13. Щетинін, В. Т. Про доцільність використання засобів 3D друку для підвищення точності статичних і динамічних досліджень важливо-оберткових механізмів / В.Т. Щетинін, В.М. Орел, О.О. Ченчева // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. — Вип. 1/2015(90). Частина 2.
14. Кудимов, Н.Ф. Численное моделирование взаимодействия многоблочных сверхзвуковых турбулентных струй с преградой / Н.Ф. Кудимов, А.В. Сафронов, О.Н. Третьякова // «Труды МАИ». Выпуск № 70. — 2014. — С. 62-75
15. Клапцов, Ю.В. Визначення конструктивних параметрів струменеформуючого пристрою / Ю. В. Клапцов, І.В. Панасюк, І.В. Петко // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки, 2013. — № 3. — С. 115—118.
16. Комельков, В.Н. Теоретическое обоснование необходимости внесения изменений в устройство режущей головки установки гидроабразивной резки / В.Н. Комельков, В.Б. Смирнов, Б.Н. Марьин, В.А. Ханов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. — Серия «Машиностроение», вып. 1. — 2013. — С.49-54.
17. Раубе, С.С. Струйная модель теплообмена рабочих тел капельных холодильников-излучателей перспективных космических аппаратов / С.С. Раубе, Е.К. Красночуб., В.М.Бронштейн // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. — №3, (19). — 2009. — с. 122—140.

Reference

1. Tikhomirov, R. A. Hydroprocessing as a process and equipment / R.A. Tikhomirov — STIN № 6, 1997. — p.44—48.
2. Salenko, A.F. Cutting of polycrystalline superhard materials by jet methods // A.F. Salenko, V.T. Shchetinin, G.V. Gabuzyan, V. A. Nikitin, N. V. Novikov, S. A. Klimenko. — Sverkhтвердые Materials, 2016. — Vol. 38, No. 5. — pp. 80—94.
3. Kiyohashi, H. Study of Production of Ice Particles by the Heat of Vaporization of Cryogenic Liquefied Fuels and Their Applications in Ice Jets / H. Kiyohashi, K. Handa // A Proceedings of the International Symposium on New Applications of Waterjet Technology, Ishinomaki, Japan, 1999. — pp. 51—60. DOI: 10.1007 / 978-94-011-5320-1_6
4. Máša, V. Efficient Use of Compressed Air for Dry Ice Blasting / V. Máša, P. Kuba. Journal of Cleaner Production. — 2016. — vol. 111, part A. — pp. 76—84. DOI: 10.1016 / j.jclepro.2015.07.053
5. Brenner, V. Determination of the Criterion of Rock Resistance to Hydro-Mechanical and Hydro-Abrasive Cutting / V. Brenner, R. Powell, H. Louis, A. Pushkarev // Proc. International Symp. on New Applications of Water Jet Technology, 19-21 Oct. 1999. — Ishinomaki, Japan. Ishinomaki Senshu University. — P. 399-405.
6. Burnashov, M.A. Modeling of the process of destruction of a coating by a water-jet stream during the cleaning of machine

parts / M.A. Burnashov, A.N. Prezhbilov, Yu.V. Vasilenko // Vestnik SUSU. — Series "Mechanical Engineering", 2017. — T. 17, No. 2. — P. 67-73.

7. Kuznetsov, Yu.N. Application of Morphological Analysis for the Expansion of Mobility and the Sphere of Machine Use / Yu. N. Kuznetsov, Zh. A. Khamuyela Guerra // Promyslova gidravlika i pneumatika, 2012. — No. 1. — P. 111-114.

8. Salenko, O.F. Reinstallation of the rational minds of the form of the water crooked struma that viznachennya yogo rizalnih authorities / O.F. Salenko, G.V. Gabuzyan, V.T. Shchetinin, V.V. Tkachuk // Bulletin of KrSU im. M.Ostrogradsky, №6. — 2017. — pp. 76-84.

9. Stof'ko, Z.A. Matematichna model rospodilu masi rechovini v strumeni rozpilennya pri strumeneviy obrobsi poverkhon nezvyazanymi tilamy / Z.A. Stof'ko, T.O. Stefanovich // News of the National University "Lvivska Politehnika": Optimization of the process control and technical control of machine-driven and power-driven machines. — 2005. — No. 535. — P. 39-44.

10. Salenko, A.F. Support for small cutting of waterjet treatment of the SiC-micrarrays / A.F. Salenko, G.V. Gabuzyan, V.A. Nikitin // Вісник SevNTU: Vip. 150/2014. Mashino-prilado-buduvannya y transport. — Sevastopol, 2013. — pp. 117-122.

11. Kholodny, V.Yu. Application of laser-jet method of processing for perforating honeycomb aggregate of aviation sandwich panels / V.Yu. Kholodny // East-European Journal of Advanced Technologies. — Issue. 1/5 (79). — Kharkov, 2016. — P. 19-30. DOI: 10.15587 / 1729-4061.2016.59870

12. Sibailly, O. Laser-Edge Grinding of Thin Wafers with the Water-Jet-Guided Laser / O. Sibailly, F. Wagner, B. Richerzhagen. — Future Fab International 16, February 2004.

13. Shchetinin, V. T. Pro dotsilnist 3D druku dlya pidvishennya statichnich y dinamichnich doslidgen vagilno-obertovich mehanizmv / . V.T. Shchetinin, V.M. Orel, O.O. Chencheva // Vistnic KrNU. — Vip. 1/2015 (90), Part 2.

14. Kudimov, N. F. Numerical simulation of the interaction of multi-block supersonic turbulent jets with a barrier / N.F. Kudimov, A.V. Safronov, O.N. Tretyakova // Proceedings of the MAI. Issue No. 70. — 2014. — pp. 62-75.

15. Klaptsov, Yu. V. Viznachennya konstruktivnich parametriv strumeneformuyuchich pristroiv / Yu.V. Klaptsov, I.V. Panasyuk, I.V. Petko // News of Khmelnytsky National University, 2013. — No. 3. — P. 115-118.

16. Komelkov, V. N. Theoretical justification of the need to make changes in the device of the cutting head of the waterjet cutting machine / V. N. Komelkov, V.B. Smirnov, B.N. Marin, V.A. Khanov // Uchenye zapiski Komsomolskogo-na-Amure State Technical University. — Series "Mechanical Engineering", no. 1. — 2013. — P.49-54.

17. Raube, S. S. Jet model of heat exchange of working bodies of drop coolers-emitters of perspective spacecraft / S.S. Raube, E. K. Krasnochub, V. M. Bronshtein, // Vesnik Samara State Aerospace University. — №3, (19). — 2009. — pp. 122—140.

Надійшла 15.04.2018

УДК 621.800

Формирование криогенных обрабатывающих струй с бескамерными устройствами с кольцевым соплом

А. Ф. Саленко, Г. В. Габузян, В. В. Ткачук, В. Т. Щетинин

Цель. Обосновать целесообразность применения бескамерных систем с кольцевыми струйными соплами для подвода криогенной жидкости.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использованы оригинальные методы исследования кольцевых сопел, базирующиеся на применении маломощных лазеров, позволяющих установить режимы течения жидкости, а также классические основы моделирования течения жидкости в каналах и теплообмена между контактирующими средами

Результаты исследования. Показано, что применение бескамерных средств позволяет улучшить

Formation of the cryogenic cutting flow by a cylinder nozzle without certain cases

A. F. Salenko, G. V. Gabuzyan, V. V. Tkachuk, V. T. Shchetinin

Aim. Treatment with a water-ice cutting is a promising direction in the development of jet technologies. At present, for this purpose, systems constructed according to the classical scheme for the formation of the ice phase by cryogenic liquid entering the mixing chamber are used. At last stream is formed by a calibration tube. The purpose of this work is to justify the feasibility of using tubeless systems with ring jet nozzles for supplying a cryogenic liquid.

Research methods. To solve the problems, original methods of investigation of ring nozzles based on the use of low-power lasers, allowing the establishment of fluid flow regimes, as well as the classical foundations of fluid flow modeling in channels and heat exchange between contacting media.

Results of research. It is shown that the use of tubeless means allows to improve the generation of ice, to obtain a

генерацию льда, получить более крупную фракцию частиц, что повышает эффективность обработки. Приведено сравнение фракционного состава микрочастиц льда, оценена режущая способность струи. Показано, что данный способ генерации льда целесообразен для процессов струйно-абразивной очистки поверхностей, а также для обработки материалов (в том числе, разрезания) при использовании масок. Установлены рациональные параметры предлагаемой системы для получения максимальной доли ледяных частиц, показана зависимость объема получаемого льда и его режущих свойств режимом течения жидкости на срезе кольцевого сопла, а также условиями истечения рабочей жидкости из основного (водяного) сопла.

Выводы. Предложенная конструкция позволяет легко изменять геометрические параметры генерируемых частиц благодаря применению оригинальной конструкции щелевого золотника, а отсутствие калибрующей трубки повышает эффективность водоледяной струи для указанных выше операций.

Получены фрактограммы генерированных частиц льда, установлены функциональные зависимости их размеров параметрами течения и взаимодействия потоков.

Ключевые слова: водоледяная резка, системы ледогенерации, кольцевые сопла, теплообмен в криогенном потоке, струйные методы обработки.

УДК 621.800

larger fraction of particles, which increases the processing efficiency. A comparison of the fractional composition of ice microparticles is given, and the cutting ability of the jet is estimated. It is shown that this method of ice generation is suitable for processes of jet cleaning of surfaces, as well as for cutting materials using masks. The rational parameters of the proposed system for obtaining the maximum fraction of ice particles are established, the dependence of the volume of the obtained ice and its cutting properties on the mode of fluid flow on the cutoff of the annular nozzle is shown, as well as the conditions for the flow of working fluid from the main (water) nozzle.

Conclusion. The proposed design makes it easy to change the geometric parameters of the generated particles due to the use of the original slit spool design, and the absence of a calibration tube improves the efficiency of the water-jet spray for such operations. Fractograms of generated ice particles are obtained, and functional dependencies of their dimensions on flow parameters and flux interaction are established.

Keywords: water-ice cutting, ice generation systems, annular nozzles, heat transfer in a cryogenic stream, jet treatment methods