КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ

На правах рукопису

УДК 621.91

ПЕТКО Ігор Валентинович

НАУКОВІ ОСНОВИ ПРОЕКТУВАННЯ УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ ШВИДКОПЛИННИМ ГІДРОСТРУМЕНЕМ

Спеціальність: 05.03.01 - Процеси механічної та фізико-технічної обробки, верстати та інструмент

Автореферат
дисертації на здобуття вченого ступеня
доктора технічних наук

Київ - 1993

ЛННБ України ім.В.Стефаника
00814721 (N)

Робота виконана на каф
технологічного інституту ле

Офіційні опоненти: - академік АІН України, доктор технічних наук, професор Розенберг О.О.

- доктор технічних наук, професор Струтинський В.Б.

- доктор технічних наук, професор Лебедєв В.Г.

Провідне підприємство - Науково-виробниче об'єднання "Веста", м.Київ.

Захист відбудеться "21" червня 1993 р. в 15^{00} годин на засіданні спеціалізованної ради Д 068.14.10 при Київському політехнічному інституті за адресою: 252056, м.Київ, пр.Перемоги,37, КПІ, корп.І, ауд.214.

З дісертацією можна ознайомитися в бібліотеці інституту. Автореферат розісланий 28 квітня 1993 р.

Відгук на автореферат в 2-х примірниках, завірений печаткою установи, просимо направляти по вищеуказаній адресі на ім'я вченого секретаря спеціалізованої ради.

Вчений секретар
спеціалізованої ради,
д.т.н., професор Н.С.Равська

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПРАЦІ

Актуальність теми. Традиційні способи обробки матеріалів різанням в умовах сучасного виробництва, поряд з безумовними їх перевагами, мають і ряд недоліків: значні втрати сировини у вигляді відходів, великі трудові і матеріальні витрати на виготовлення і переточування інструменту, запиленість робочого місця і виділення при нагріванні матеріалів в процесі обробки небезпечних для здоров'я обслуговуючого персоналу компонентів.

Все перелічене вище, окремо чи в сукупності, істотно збільшує трудомісткість, вартість і складність обробки і обмежує можливості застосування механічних операцій для виготовлення деталей складних контурів з листових матеріалів.

В той же час в різних галузях промисловості технологія обробки спеціальних матеріалів на основі легких металів і їх сплавів, гуми, штучної і натуральної шкіри, кераміки, прогресивних композиційних матеріалів, вибухонебезпечних матеріалів повинні забезпечити максимальну продуктивність процесу, відсутність залишкової деформації або поверхневого руйнування обробленого матеріалу внаслідок термічного окислення, напружень зсуву, теплових процесів, вібрацій і розшарування.

Обробка матеріалів гідро- або гідроабразивним струменем високої швидкості має потенційні можливості для створення подібної технології. Крім того, цей метод обробки дає можливість запропонувати нові конструктивні рішення обладнання для виготовлення виробів складних контурів.

Досвід використання в технологічних операціях для розкрою матеріалів гідроструменем високої швидкості показав можливість ефективної обробки ряду матеріалів, для яких традиційні методи малоефективні або взагалі неприйнятні. Перевага цього способу в тім, що струмень рідини дає можливість обробляти контур виробу будь-якого радіуса закруглення, виключає використання дорогого механічного інструменту, забезбечує невелику ширину розрізу, зменшує відходи матеріалу, поліпшує умови праці обслуговуючого персоналу. Специфічна особливість гідрорізного обладнання дає можливість створювати автоматизовані комплекси, якими управляють за допомогою ЕОМ.

Відповідно викладеному вище, розробка наукових основ проектування устаткування, в якому для обробки матеріалів використовується енергія високошвидкісного гідро або гідроабразивного струменя, уявляється важливою науковою проблемою, рішення якої дозволить реа-

лізувати прогресивний процес і тим самим вирішити народно-господарське завдання обробки відомих та заново розроблюваних конструкційних матеріалів, які використовуються в багатьох галузях промисловості.

Метою досліджень є розробка наукових основ проектування обладнання для обробки матеріалів гідро або гідроабразивним струменем високої швидкості та визначення його раціональних параметрів, що повинно забезпечити при реалізації в промисловості високоефективну обробку матеріалів (підвищення якості обробки та продуктивності праці при зниженні витрат сировини).

Наукова новизна. Виконано комплексне дослідження технологічного процесу обробки конструкційних матеріалів високошвидкісним гідро або гідроабразивним струменем.

Розроблена фізична і математична модель процесу.

Отримана з використанням методу фотопружності наочна картина процесу, що підтвердила правомірність прийнятої фізичної моделі.

Аналітично визначена залежність продуктивності процесу від параметрів струменя, властивості і товщини розрізуваних матеріалів.

Розроблена математична модель і отримані в загальному вигляді диференціальні рівняння стану гідравлічної системи гідрорізного устаткування на протязі всього робочого циклу, які дають можливість прогнозувати характер її функціонування в залежності від параметрів вибраних конструктивних елементів, властивостей оброблюваних матеріалів і вимог до технологічного процесу.

Отримана математична модель плину рідини в сопловому насадку і розроблений алгоритм її рішення.

Проведені комплексні дослідження соплових насадків, які дозволили визначити вплив профілю каналу струменеформуючого сопла на параметри течії рідини.

Практичне значення праці. Розроблені і доведені до алгоритмів і програм для ЕОМ розрахунки раціональних параметрів конструктивних елементів гідрорізного устаткування.

Розроблені установки для високоефективного гідро або гідроабразивного різання.

Результати проведених дослідів можуть бути використанні в різних галузях промисловості при розробці технологічних процесів, проектуванні і реалізації в промисловості гідрорізного устаткування.

Впровадження результатів досліджень. Розроблені при безпосередній участі автора і під його керівництвом конструкції, методи їх розрахунку, технологічні режими, алгоритми і програми впроваджені

на Київському механічному заводі, Дніпропетровському філіалі НДІ технології машинобудування, НВО "Південмаш", Мінському НВО "Інтеграл", Московскому НДІ "Асбестоцемент", Брошнівському заводі "Автоматика", ЦНДІ технології суднобудівництва і інш.

Основні результати праці використовуються в учбових процесах, в лекційних курсах по технології машинобудування та машинам і апаратам легкої промисловості.

Реальний річний екеномічний ефект від реалізації в промисловості результатів досліджень становить понад 600 тис. карбованців, очікуваний - 2 млн.карбованців (в цінах 1985 року).

Апробація праці. По матеріалам дисертації надруковано 36 праць (в тому числі одна монографія) в наукових виданнях, включених в затверджені ВАК списки.

Новизна отриманих результатів захищена 11 авторськими свідоцтвами.

Основні положення і результати проведеної роботи доповідалися і отримали позитивну оцінку на 12 Всесоюзних та Республіканських конференціях і семінарах.

Під науковим керівництвом автора виконані і успішно захищені 5 кандидатських дисертацій.

Автор захищає: теоретичне узагальнення рішення наукової проблеми, яка полягає в створенні наукових основ обробки матеріалів гідро або гідроабразивним струменем рідини і проектування гідрорізного устаткування на основі виявлених закономірностей взаємодії високошвидкісного струменя з оброблюваним матеріалом, які дають можливість розробляти нові конструкції устаткування, забезпечувати високу продуктивність праці і якість обробки.

Структура і обсяг праці. Дисертація складається з вступу, восьми розділів, загальних висновків, списка літератури і додатків.

Зміст праці викладено на 514 сторінках машинописного тексту, містить 82 рисунка, 7 таблиць. Бібліографія включає 303 найменування. Додатки викладені на 155 сторінках.

У вступі обгрунтована актуальність теми досліджень та викладені основні положення, що винесені на захист.

У першому розділі проведений аналіз традиційних і заново розроблюваних способів обробки матеріалів в розкрійнім виробництві різних галузей промисловості; розглянуті конструкції гідрорізних установок; проаналізовані існуючі розрахункові залежності і математичні моделі як процесу гідрообробки, так і гідросистем високого тиску, які застосовуються в гідрорізному устаткуванні.

В другому розділі викладені результати аналітичних досліджень процесу руйнування матеріалів під впливом високошвидкісного гідро або гідроабразивного струменя. Приведена аналітична залежність, яка відображає взаємозв'язок основних технологічних параметрів установки і характеристик міцності розрізуваного матеріалу.

В третьому розділі наведені результати дослідження методом фотопружності напруженого стану матеріалу, який піддається дії високошвидкісного струменя; описана методика визначення напруг в будь-якій точці навантаженої зони; проведений аналіз отриманих картин руйнування.

В четвертому розділі приведені результати аналітичного дослідження процесів в гідросистемі гідрорізної установки на протязі усього робочого циклу.

В п'ятому розділі викладені результати досліджень впливу конструктивних елементів гідросистеми на стабільність витікання із струменеформуючого сопла ріжучого струменя рідини; проведена експериментальна перевірка розробленої математичної моделі.

В шостому розділі проведені аналітичні дослідження плину рідини в сопловому насадку гідрорізної установки; розроблена математична модель процесу.

В сьомому розділі приведені результати експериментальних досліджень соплових насадків гідрорізного устаткування.

У восьмому розділі на основі проведених аналітичних і експериментальних досліджень запропонована конструкція гідрорізної установки із двостороннім мультиплікатором.

В заключенні викладені загальні висновки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ПРАЦІ

Аналіз науково-технічної літератури показав, що традиційні способи розкрою механічним впливом на матеріал є високоефективними в масовому виробництві при устояних асортименті та типорозмірах розкрійних деталей. Одначе в дрібносерійному та індивідуальному виробництві з частою зміною асортименту виробів переважаючими являються нетрадиційні способи, зокрема, з використанням високошвидкісного гідроструменя. Розкрій матеріалу високошвидкісним гідроструменем дозволяє зменшувати міждетальну відстань, дає змогу викроювати деталі з контуром будь-якої складності, здійснювати різання без істотного підвищення температури в зоні обробки, частково чи повністю автоматизувати процес різання, ліквідувати затрати на

виготовлення, установку і переточування різаків.

Одним з основних факторів, що стримують промислове впровадження гідрорізання в нашій країні, є відсутність устаткування, що серійно випускається, науково обгрунтованих методик його конструювання і розрахунку, що обумовлено, головним чином, як недостатньою вивченістю процесів, що протікають в гідросистемах при високих тисках рідини, так і при взаємодії високошвидкісного струменя з оброблюваним матеріалом.

Незважаючи на ряд досліджень, виконаних в галузі гідрорізання, до теперішнього часу немає достатньо обгрунтованої теорії руйнування матеріалів під впливом високошвидкісного гідро або гідроабразивного струменя, а експериментальні роботи, як правило, є такими, що дають поодинокі емпіричні залежності взаємозв'язку технологічних параметрів процесу з характеристиками міцності оброблюваного матеріалу.

До цього часу розрахунок параметрів гідросистеми проводився без урахування впливу на характер функціонування гідросистеми перехідних процесів, пов'язаних з реверсуванням поршня і плунжерів гідромультиплікатора, і не дозволяв визначити, наскільки розраховані по відомим формулам параметри близько підходять до оптимальних значень конструктивних елементів установки, тому що комплексні експериментальні і теоретичні дослідження в цій галузі не проводилися.

Дослідження соплових насадків показало, що існуючі рекомендації по профілюванню струменеформуючих сопел не забезпечуть доотатню ефективність витікання рідини в гідрорізних установках, тому що застосовувані аналітичні залежності, в основному, запозичені з теорії розрахунку гідромоніторів і елементів турбін, де використовуються струменеформуючі канали зі значно більшими діаметрами і, отже, іншими градієнтами швидкостей струменя.

Тому що існуючі засоби вимірювання не дозволяють провести виміри параметрів потоків безпосередньо в каналах струменеформуючих сопел, більш доцільним методом дослідження соплового насадка, на нашу думку, можна вважати метод математичного і, зокрема, числового моделювання, який оснований на виборі і рішенні рівнянь, що описують течію рідини в струменеформуючому каналі.

Таким чином, для створення сучасного гідрорізного устаткування необхідні аналітичні дослідження руху робочого середовища в системі високого тиску, в сопловому насадку і при взаємодії з оброблюваним матеріалом, які могли б бути покладені в основу розрахунку конструктивних і технологічних параметрів пристроїв на стадії проек-

тування, не вдаючись до складних експериментів.

Виходячи з викладеного вище, в праці поставлені такі основні задачі.

Науково обгрунтувати взаємозв'язок фізичних, механічних і технологічних властивостей оброблюваних високошвидкісним струменем рідини матеріалів з параметрами гідрорізної установки і продуктивністю процесу.

Вивчити динаміку руху робочого середовища і поведінку елементів гідросистеми високого тиску протягом усього робочого циклу; розробити програму, яка дозволить моделювати функціонування гідросистеми гідрорізної установки в залежності від обраних параметрів її елементів.

Провести комплексні дослідження руху робочого середовища в сопловому насадку гідрорізної установки.

Розробити математичні моделі динаміки робочого середовища в гідрорізному устаткуванні на основі гідродинамічних модулів.

На основі аналітичних і експериментальних досліджень розробити методику проектування гідрорізного устаткування.

Вивчити вплив конструктивних і технологічних параметрів гідрорізної установки на ефективність технологічного процесу.

Розробити і дослідити нові види гідрорізного устаткування і реалізувати їх в промисловості.

Для дослідження процесу різання матеріалу під впливом високошвидкісного струменя рідини виділений об'єм із області руйнування з контактною поверхнею, яка рухається в глибину (рис.I,а). Тому що глибина проникнення струменя в матеріал за малий інтервал часу значно більша величини переміщення зразка, обумовленого швидкістю подачі, то поширення контактної поверхні в горизонтальній площині апроксимовано послідовністю ступенів (розміри яких відповідають діаметру сопла) за період часу, який потрібен для наскрізного прорізування матеріалу. Для спрощення фізичної моделі процес руйнування матеріалу в зоні контакту розділений на дві стадії: перша характеризується деформацією і ущільненням матеріалу в центрі дії струменя без втрат його маси; друга - розтягненням оброблюваного матеріалу по краю навантаженої зони з утворенням і злиттям мікротріщин при інтенсивному виносі матеріалу у вигляді дрібних часток.

Для визначення глибини проникнення струменя в матеріал на першій стадії ($H_п$) з об'єма матеріалу виділений елемент, який сприймає напругу від дії високошвидкісного струменя рідини. Вертикальна складова переміщення елементу під дією струменя визначена нами в праці(I7)

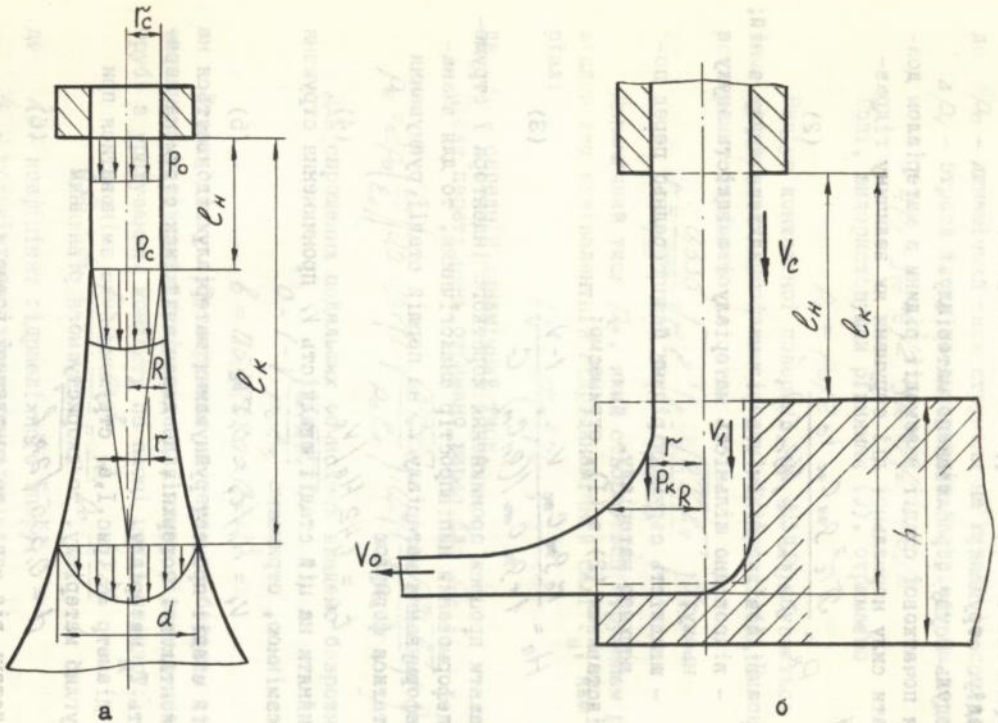

Рис.I. Схеми процесу гідрорізання:
а) зміна структури струменя при взаємодії з повітрям;
б) схема взаємодії струменя рідини з матеріалом.

$$H_п = (1-\nu) P_н / (\pi r_c G), \qquad (1)$$

де ν - коефіцієнт Пуассона;

$P_н$ - нормальна сила дії струменя на матеріал;

r_c - радіус струменя;

G - модуль зсуву оброблюваного матеріалу.

Вивчення початкової стадії взаємодії рідини з матеріалом дозволило отримати силу нормальної дії струменя як величину гідравлічного удару

$$P_н = \frac{\pi r_c^2 \rho_{ж} c_{ж} V_c}{1 + \rho_{ж} c_{ж} / (\rho_м c_м)}, \qquad (2)$$

де $\rho_{ж}$ і $c_{ж}$ - відповідно щільність рідини і швидкість звуку в ній;

$\rho_м$ і $c_м$ - відповідно щільність матеріалу і швідкість звуку в ньому;

V_c - швидкість струменя рідини безпосередньо перед поверхнею матеріалу.

Тоді, підставивши (2) в (I), отримаємо:

$$H_п = \frac{r_c \rho_{ж} c_{ж} V_c}{1 + \rho_{ж} c_{ж} / (\rho_м c_м)} \cdot \frac{1-\nu}{G} \qquad (3)$$

Якщо вважати процеси проникнення жорсткого індентора і струменя рідини в деформований напівпростір аналогічними, то для визначення часу деформування матеріалу t_1 на першій стадії руйнування можна скористатися формулою

$$t_1 = 1{,}42 H_п / V_c \qquad (4)$$

Якщо прийняти на цій стадії швидкість V_1 проникнення струменя в матеріал незмінною, отримаємо

$$V_1 = H_п / t_1 \approx 0{,}7 V_c \qquad (5)$$

На другій стадії процесу руйнування матеріалу відбувається на тій частині контактної поверхні, де динамічний тиск струменя перевищує міцність $T_м$ матеріалу.

Тому що діаметр d (рис.I,а) струменя буде змінюватися при проникненні углиб матеріалу, то скористуємося рівнянням

$$d = 0{,}335 \sqrt{2 r_c l_к}, \qquad (6)$$

де $l_к$ - відстань від сопла до контактної поверхні.

Динамічний тиск в зоні осі струменя на основній ділянці визначається рівнянням

$$p_c = p_1 l_н / l_к, \qquad (7)$$

де $l_н$ - довжина початкової (нерозширеної) ділянки струменя;

p_1 - динамічний тиск на границі пружної і пластичної зон.

Динамічний тиск

$$p_1 = p_0 - \Delta p_1 \,, \qquad (8)$$

де p_0 - динамічний тиск струменя на виході із сопла;

Δp_1 - втрата тиску на деформацію матеріалу на першій стадії.

$$\Delta p_1 = \rho_m V_c^2/2 - \rho_m V_1^2/2 = p_0/2 \qquad (9)$$

Тоді, використовуючи рівняння (9), отримаємо

$$p_1 = p_0/2 \qquad (10)$$

Радіус контактної поверхні, на якій відбувається різання, назвемо ефективним і позначимо через r (рис.I,б). Виконавши ряд перетворень, отримаємо

$$r = \frac{0{,}335}{\sqrt{2}} \sqrt{r_c l_H} \left(1 - \sqrt{\frac{2\tau_m l_k}{p_0 l_H}}\right)^{2/3} \qquad (11)$$

Динамічний тиск p_e, який створюється струменем радіуса r, відповідає еквівалентній гідродинамічній силі P_H, яка руйнує матеріал:

$$P_H = \pi r^2 p_e \,, \qquad (12)$$

де p_e - середній динамічний тиск.

Після перетворень отримано вираз для p_e :

$$p_e = 2p_0 \left(\frac{l_H}{l_k}\right)\left[0{,}5 - 0{,}57\left(1 - \sqrt{\frac{2\tau_m l_k}{p_0 l_H}}\right) + 0{,}2\left(1 - \sqrt{\frac{2\tau_m l_k}{p_0 l_H}}\right)^2\right] \qquad (13)$$

Для спрощення подальших обчислень введемо безрозмірні величини:

$$a = 1 - \sqrt{\frac{2\tau_m l_k}{p_0 l_H}} \,, \qquad (14)$$

$$b = 0{,}5 - 0{,}57a + 0{,}2a^2 \qquad (15)$$

Втрати тиску Δp_2 струменя на тертя по боковим стінкам розтину визначені з рівняння гідравліки для плину рідини в циліндричній трубі з урахуванням контакту по площі напівциліндру:

$$\Delta p_2 = \lambda_1 \frac{h - H_n}{2r} \cdot \frac{\rho V_1^2}{2} = \frac{\lambda_1}{2} p_0 \frac{h - H_n}{r} \,, \qquad (16)$$

де λ_1 - коефіцієнт гідравлічного опору;

h - товщина розрізуваного матеріалу.

Уявивши струмінь рідини, який ріже, як сукупність елементарних струменів масою dm , кожний з яких прорізує матеріал на глибину dh , визначимо критичну швидкість V_{kp}, що характеризує кінетичну енергію струменя, при якій припиняється процес різання.

Використавши рівняння Бернулі для тиску на поверхні контакту, з умови забезпечення процесу різання отримаємо:

$$V_{кр} = \sqrt{2T_м/\rho} \qquad (I7)$$

Прирівнявши втрати кінетичної енергії струменя і роботу гідродинамічних сил на подолання опору матеріалу на ділянці dh отримаємо:

$$\frac{dm(V_c^2 - V_{кр}^2)}{2} = \int_{l_к+dh}^{l_к} P_к\, dh \,, \qquad (I8)$$

де $P_к$ - сила, яка визначається контактним тиском

$$P_к = \pi T_м r^2 \qquad (I9)$$

За час dt через вихідний отвір сопла пройде маса рідини

$$dm = \pi r^2 \rho_ж V_c\, dt \qquad (20)$$

Після інтегрування і підставлення значення сили $P_к$ з рівняння (I9) і dm з (20) у вираз (I8) отримаємо час dt, який буде потрібний для руйнування матеріалу товщиною dh:

$$dt = \frac{T_м r^2\, dh}{(\rho_c - T_м) r_c^2 V_c} \qquad (2I)$$

Із рівняння (2I) з урахуванням усіх втрат визначається повний час проникнення струменя в матеріал на другій стадії:

$$t_2 = \frac{T_м r^2 (h - H_п)}{(\rho_c - 0{,}25\rho_0 \lambda_1 (h-H_п)/r - T_м) r_c^2 V_c} \qquad (22)$$

Підсумувавши значення, які отримані в рівняннях (4) і (22), отримаємо загальний час прорізування. Тому що за цей час матеріал переміститься в горизонтальному напрямку на відстань $2r_c$, то з урахуванням виразів (I4) і (I5), отримаємо швидкість подачі матеріалу:

$$S_п = \frac{2r_c}{t} = 2\frac{r_c \rho_ж^{0,5}}{\rho_0^{0,5}} \Bigg/ \left\{ H_п + \frac{5{,}6\cdot 10^{-2} T_м l_к (h-H_п) a^{4/3}}{r_c \left[\rho_0 \frac{B l_н}{l_к} - \frac{(h-H_п)\lambda_1}{\sqrt{r_c l_к}\, a^{2/3}} - T_м \right]} \right\} \qquad (23)$$

Використовуючи отриманий вираз, можна, міняючи величину тиску робочої рідини або діаметр сопла, в кожному конкретному випадку розраховувати тривалість обробки матеріалів з різними характеристиками міцності, а, отже, і продуктивність установки для гідрорізання.

Ріжучі властивості струменя можна істотно підвищити за рахунок введення в зону різання абразивних часток. Схема утворення гідроабразивного струменя приведена на рис.2. Робоча рідина, проходячи через зміщувальну камеру 3, захоплює частки абразива, які надходять

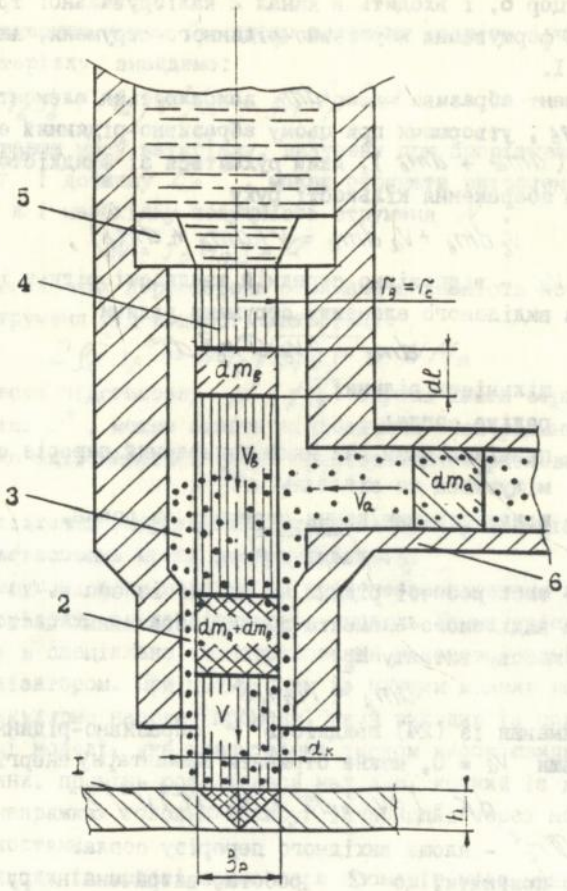

Рис.2. Схема утворення гідроабразивного струменю.

через штуцер 6, і входить в канал 2 калібрувальної трубки, де відбувається формування абразивно-рідинного струменя, який розрізує матеріал I.

Елемент абразива масою dm_a захоплюється елементом струменя масою $dm_в$, утворюючи при цьому абразивно-рідинний елемент струменя масою ($dm_a + dm_в$), який рухається зі швидкістю V. Згідно з законом збереження кількості руху

$$V_в\, dm_в + V_a\, dm_a = V(dm_a + dm_в), \qquad (24)$$

де $V_в$ і V_a - відповідно середній швидкості рідини і абразиву.

Маса виділеного елементу струменя рідини

$$dm_в = \rho V_в \pi r_c^2\, d\tau, \qquad (25)$$

де ρ - щільність рідини;

r_c - радіус сопла;

$d\tau$ - проміжок часу, за який поперечний переріз струменю переміщується на відстань dl;

$V_в$ - швидкість витікання струменя із сопла.

$$V_в = \sqrt{2p_в/\rho}, \qquad (26)$$

де $p_в$ - тиск робочої рідини на виході із сопла.

Маса виділеного елемента потоку абразивних часток визначається через масову витрату M_a:

$$dm_a = M_a\, d\tau \qquad (27)$$

Отримавши із (24) швидкість V абразивно-рідинного потоку і прийнявши $V_a = 0$, можна отримати елементарну енергію потоку dK.

$$dK = (\rho V_в f_в\, d\tau + M_a\, d\tau)V^2/2, \qquad (28)$$

де $f_в = \pi r_c^2$ - площа вихідного перерізу сопла.

Якщо прийняти, що a - робота, витрачена на руйнування одиниці маси матеріалу протягом часу $d\tau$, то $A = a \cdot dm_м$ - робота, яка витрачається на руйнування маси $dm_м$ матеріалу.

Враховуючи, що кінетична енергія струменя dK повністю витрачається на руйнування матеріалу, знайдемо

$$(\rho V_в f_в + M_a)\frac{V^2}{2}\, d\tau = a\, dm_м \qquad (29)$$

Протягом часу $d\tau$ оброблювальний матеріал переміститься на відстань $dl_м$.

$$dl_м = S_п\, d\tau, \qquad (30)$$

де $S_п$ - швидкість подачі.

Якщо позначити через f_p площу перетину розрізу і через $\rho_м$ щільність матеріалу, знайдемо:

$$(\rho v_в f_в + M_a) v^2/2 = \rho_м f_p S_п a \qquad (3I)$$

Розрахувавши масу матеріалу, вилучену при прорізуванні його на глибину h і довжину l_p, можна отримати витрачену при цьому роботу А і необхідну потужність струменя N.

$$N = f_p S_п \rho_м a \qquad (32)$$

Після нескладних перетворень отримана залежність необхідної потужності струменя від міцності матеріалу:

$$2\rho_в^2 f_в^2 = N f_в \sqrt{2\rho_в \rho} + N M_a \qquad (33)$$

Якщо ввести підстановку $p^* = \sqrt{\rho_в}$ і розв'язати отриманий вираз відностно p^*, можна знайти мінімальний тиск рідини $\rho_в$, при якому буде здійснюватися повне прорізування оброблюваного матеріалу.

Для дослідження напруженного стану матеріалу під дією тиску рідини $\rho_в$ застосовано метод фотопружності.

Використовуючи ефект подвійного променезаломлювання в оптично чутливих матеріалах, що досліджуються, модель із матеріалу ФЛ-I розташовували в спеціально сконструйованій установці поміж полярископом і аналізатором. При цьому одну із площин моделі встановлювали перпендикулярно напряму променя, який виходив із полярізатора. В кожній точці моделі, яка навантажена тиском високошвидкісного струменя рідини, промінь розкладався над два, кожний із яких поляризувався в напрямках головних напруг і проходив через модель з різними швидкостями.

Після виходу із моделі кожна пара променів мала різницю ходу, пропорційну різниці головних напруг в даній точці. В подальшому промені, зведені в одну площину аналізатором, в окулярі мікроскопа давали інтерференційну картину смуг, яка інтерпретувалась як поле напруг (рис.3).

Використавши основний закон фотопружності,

$$\sigma_1 - \sigma_2 = m\sigma_0 , \qquad (34)$$

де $\sigma_1 - \sigma_2$ - різниця головних напруг, що відповідають смугам картини;

m - номер смуги картини;

σ_0 - ціна смуги моделі,

визначили величину різниці головних напруг в будь-якій точці смуги картини.

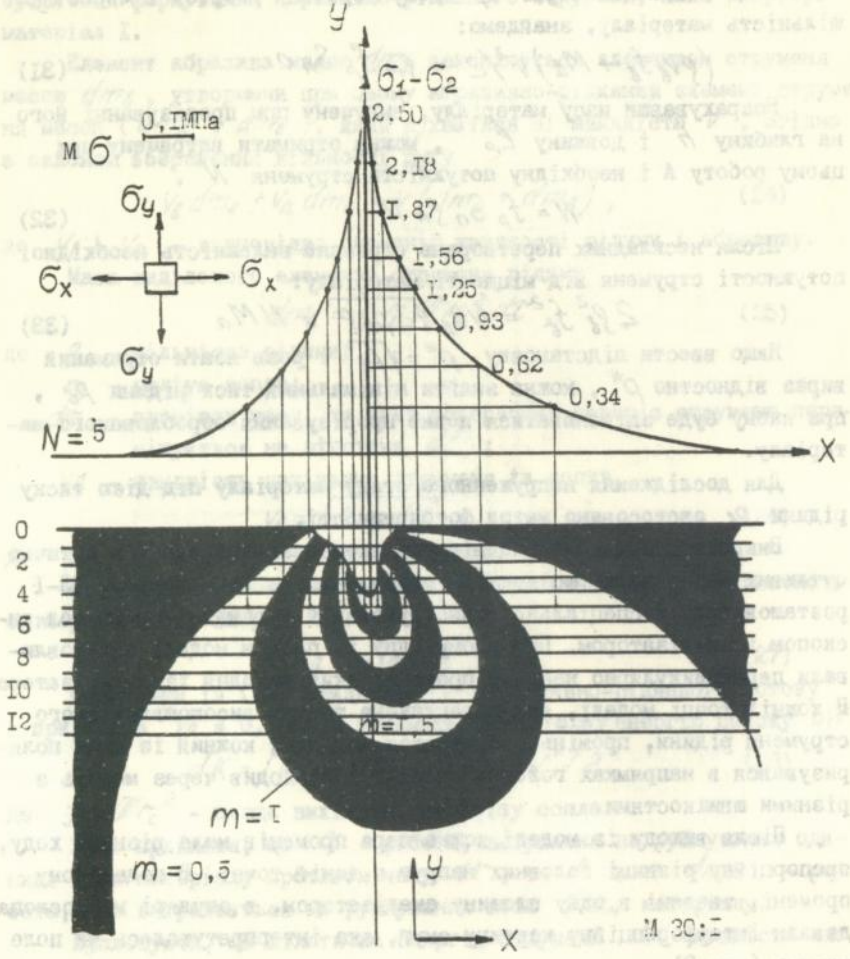

Рис.3. Загальна картина розподілу напруг та величини різниць $\sigma_1 - \sigma_2$ в перерізі 5.

Враховуючи, що смуга виявляється геометричним місцем точок, які мають одну і ту ж величину τ_{max} - найбільшої дотичної напруги, її визначили по формулі

$$\tau_{max} = (\sigma_1 - \sigma_2)/2 \qquad (35)$$

Аналіз отриманих результатів різниці головних і найбільших дотичних напруг по картині смуг і розрахунковим залежностям (на рис.3 приведений результат розрахунку для перерізу 5) показав, що величини цих напруг мають максимальне значення в центрі прикладення зусилля і зменшуються по мірі віддалення від нього.

На основі проведених досліджень виділені дві стадії механізму руйнування. На першій стадії силової дії спостерігалася пружна деформація з подальшим розривом зв'язків поміж молекулами і утворення мікротріщин. Це відбувалося в тому випадку, коли напруга в матеріалі перевищувала межу міцності на розрив.

При подальшій дії на матеріал (за рахунок збільшення тиску струменя або часу його дії) відбувається розростання тріщин.

Вивчення картини ізоклін і розетки смуг показало, що максимальна величина напруг зміщувалася з поверхні матеріалу в вершини утворених тріщин, а як тільки досягались критичні напруги відбувалося мікроруйнування з відривом часток у вигляді гранул, а також розвиток і зростання мікротріщин, які зародилися заново.

Порівняння напруженого стану матеріалу під дією струменя рідини і зосередженої сили показало їх подібність. Тому, використавши розв'язання задачі про дію сили, зосередженої на поверхні напівнескінченного тіла (задача Фламана), визначили величини нормальних напруг σ_1 і σ_2 в навантаженій потоком рідини зоні. При цьому величини напруг, які отримані розрахунковим шляхом і експериментально з допомогою методу фотопружності, відрізнялися не більше ніж на 15 %, що підтвердило можливість використання методів прикладної теорії пружності для розрахунку напруженого стану матеріалу при гідрорізанні.

Крім того, проведені методом фотопружності дослідження підтвердили наше припущення про те, що зародження тріщин починається на границі пружної і пластичної зон, де виникають значні напруги від розтягу. Ці напруги повинні перевищувати межу міцності матеріалу на розтяг.

Ефективність процесу гідрорізання в значній мірі залежить від коливання тиску в системі установки. Для досліджень процесів, що

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

відбуваються в гідросистемі установки на протязі усього робочого циклу прийнята гідравлічна система (рис.4), яка включає: масляну систему низького тиску (МСНТ), що складається із бака I, насоса 2, переливного клапана 3, гідроочисника 5 і гідророзподільника 6;

водяну систему низького тиску (ВСНТ), яка утворена підвідними трубопроводами і гідроочисником I8;

гідромультиплікатор I0;

водяну систему високого тиску (ВСВТ), що складається із усмоктуючих 7 і нагнітаючих 9 клапанів, гідроакумулятора I5, струмінеформуючої головки I7 і з'єднувальних трубопроводів високого тиску.

Для контролю тиску в МСНТ і ВСВТ в схему включені манометри 4 і I6.

Зміна напряму руху (реверсування) поршня I2 і плунжерів II мультиплікатора при підході до крайніх положень здійснюється дією поршня на штовхачі I3, що производить до замикання або розмикання контактів перемикачів I4, які виробляють сигнал управління для системи переключення гідророзподільника 6.

Підвищення тиску робочої рідини до заданого значення здійснюється шляхом стискання її в циліндрах високого тиску (ЦВТ) 8 плунжерами II, які переміщуються.

Реверсування поршня супроводжується його гальмуванням, зупинкою і наступним розгоном, що производить до виникнення в ВСВТ пульсацій тиску, які порушують стабільність витікання ріжучого струменя і знижують продуктивність і якість обробки. Зменшення пульсацій досягається при допомозі гідроакумулятора I5.

Виходячи з наведеного опису роботи гідросистеми, її робочий цикл можна уявити як послідовність етапів, що визначаються швидкістю руху поршня: усталений рух; початок гальмування; інтенсивне гальмування до повної його зупинки; прискорений рух при закритих нагнічуючих клапанах ЦВТ; прискорений рух до виходу системи на усталений режим.

Тому при аналізі функціонування системи розглянуто окремо кожний із етапів.

Перед початком дослідження процесів, що протікають в гідросистемі, зроблено розрахунок параметрів її елементів, які в найбільшій мірі впливають на падіння $\Delta p_в$ тиску на вході в сопло за час реверсування поршня мультиплікатора.

Аналіз результатів розрахунку параметрів елементів гидросисте-

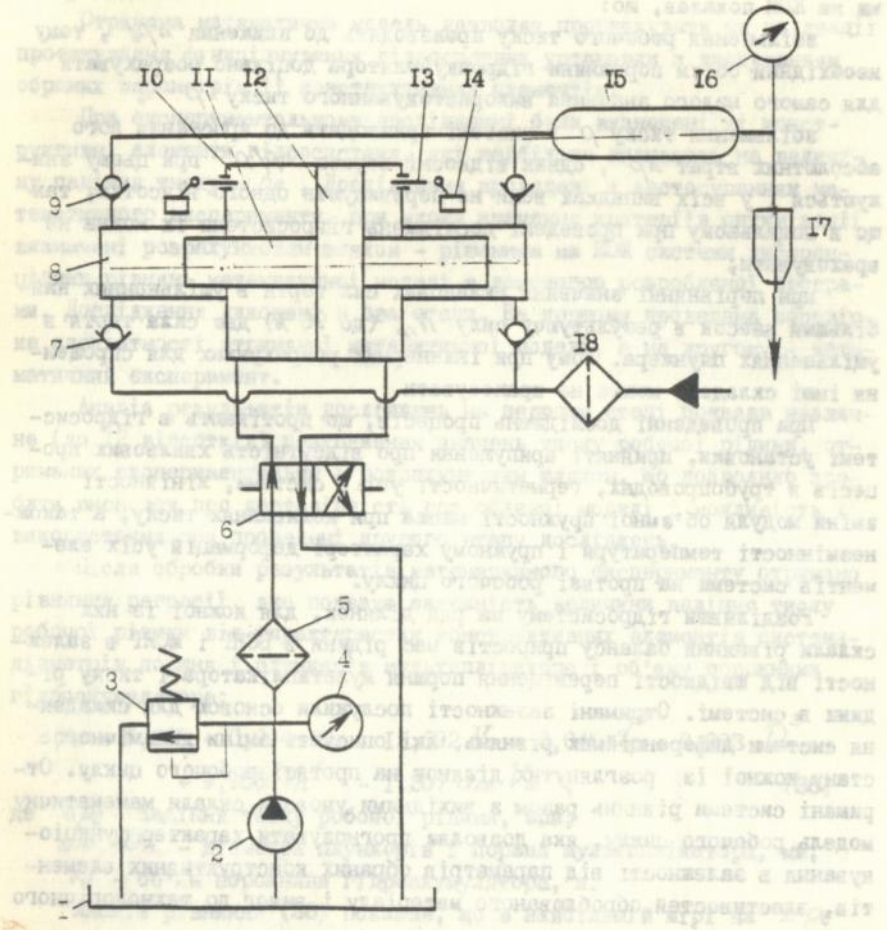

Рис.4. Гідравлічна схема установки для розрізання матеріалів високошвидкісним струменем рідини.

ми на ЕОМ показав, що:

збільшення робочого тиску производить до зниження $\Delta p_в$, тому необхідний об'єм порожнини гідроакумулятора доцільно розрахувати для самого малого значення використовуванного тиску p ;

збільшення тиску p в системі призводить до зростання його абсолютних втрат Δp , однак відносні втрати $\Delta p/p$ при цьому знижуються і у всіх випадках вони не перевищують одного відсотка, так що в подальшому при проведені досліджень гідросистеми їх можна не враховувати;

при порівнянні значення складових сил тертя в ущільненнях найбільший внесок в результуючу силу $N_{тр}$ (до 96 %) дає сила тертя в ущільненнях плунжера. Тому при інженерних розрахунках для спрощення інші складові можна не враховувати.

При проведенні досліджень процесів, що протікають в гідросистемі установки, прийняті припущення про відсутність хвильових процесів в трубопроводах, герметичності усієї системи, лінійності зміни модуля об'ємної пружності масла при коливаннях тиску, а також незмінності температури і пружному характері деформацій усіх елементів системи на протязі робочого циклу.

Розділивши гідросистему на ряд ділянок, для кожної із них склали рівняння балансу приростів мас рідини в ВСНТ і МСНТ в залежності від швідкості переміщення поршня мультиплікатора і тиску рідини в системі. Отримані залежності послужили основою для складення системи диференційних рівнянь, які описують зміни динамічного стану кожної із розглянутих ділянок на протязі робочого циклу. Отримані системи рівнянь разом з вихідними умовами склали мамематичну модель робочого циклу, яка дозволяє прогнозувати характер функціонування в залежності від параметрів обраних конструктивних елементів, властивостей оброблюваного матеріалу і вимог до технологічного процесу.

Ця система диференційних рівнянь розв'язана на ЕОМ СМ-1420.

Результати розрахунків при інших вихідних даних показали, що у випадку застосування в гідросистемі елементів з низькою податливістю урахування пружніх деформацій трубопроводів, циліндрів, плунжерів і гідроакумуляторів, а також зміни модуля об'ємної пружності масла незначно впливають (менше одного відсотка) на величину тиску робочої рідини в сопловій головці. Нехтуючи при практичних розрахунках гідрорізних пристроїв цими параметрами, можна значно спростити матема-

тичну модель.

Отримана математична модель дозволяє прогнозувати ще на стадії проектування функціонування гідросистеми установки з врахуванням обраних параметрів її конструктивних елементів.

При експериментальному дослідженні були визначені ті конструктивні елементи гідросистеми, які найбільше впливають на величину падіння тиску $\Delta p_в$, Дослідження проведені з застосуванням математичного експерименту, при якому значення критеріїв оптимізації визначені розрахунковим шляхом - рішенням на ЕОМ системи диференційних рівнянь математичної моделі з допомогою розробленої програми. Дослідження виконані в два етапи. На першому проведена перевірка адекватності отриманої математичної моделі, а на другому - математичний експеримент.

Аналіз результатів досліджень на першому етапі показав незначне (до 12 відсотків) розходження значень тиску робочої рідини, отриманих експериментально і розрахунковим шляхом, що дозволило зробити висновок про достовірність розробленої моделі і можливість її використання при проведені другого етапу досліджень.

Після обробки результатів математичного експерименту отримано рівняння регресії, яке показує залежність величини падіння тиску робочої рідини від характеристик конструктивних елементів системи-діаметрів поршня і плунжерів мультиплікатора і об'єму порожнини гідроакумулятора:

$$\Delta p_в = 6{,}865 + 0{,}994\, d_{пл} - 12{,}692\, V_a + 0{,}045\, d_{пл}^2 + 0{,}003\, D_п^2 + 9{,}955\, V_a^2 - 1{,}207\, d_{пл} V_a \,, \qquad (36)$$

де $\Delta p_в$ - падіння тиску робочої рідини, МПа;

$d_{пл}$, $D_п$ - діаметри плунжерів і поршня мультиплікатора, мм;

V_a - об'єм порожнини гідроакумулятора, л.

Аналіз рівняння (36) показав, що в найбільшій мірі на $\Delta p_в$ впливає величина діаметра $d_{пл}$ плунжера, в дещо меншій - об'єм V_a порожнини гідроакумулятора і в найменшій - діаметр $D_п$ поршня мультиплікатора.

На основі рівняння (36) побудовані графіки залежності величини падіння $\Delta p_в$ тиску в системі від діаметра $d_{пл}$ плунжера (рис.5,б), і об'єму V_a порожнини гідроакумулятора (рис.5,а), із яких випливає, що величина $\Delta p_в$ знижується при зменшенні $d_{пл}$ і збільшенні V_a . При цьому найменші значення $\Delta p_в$ досягаються при мінімаль-

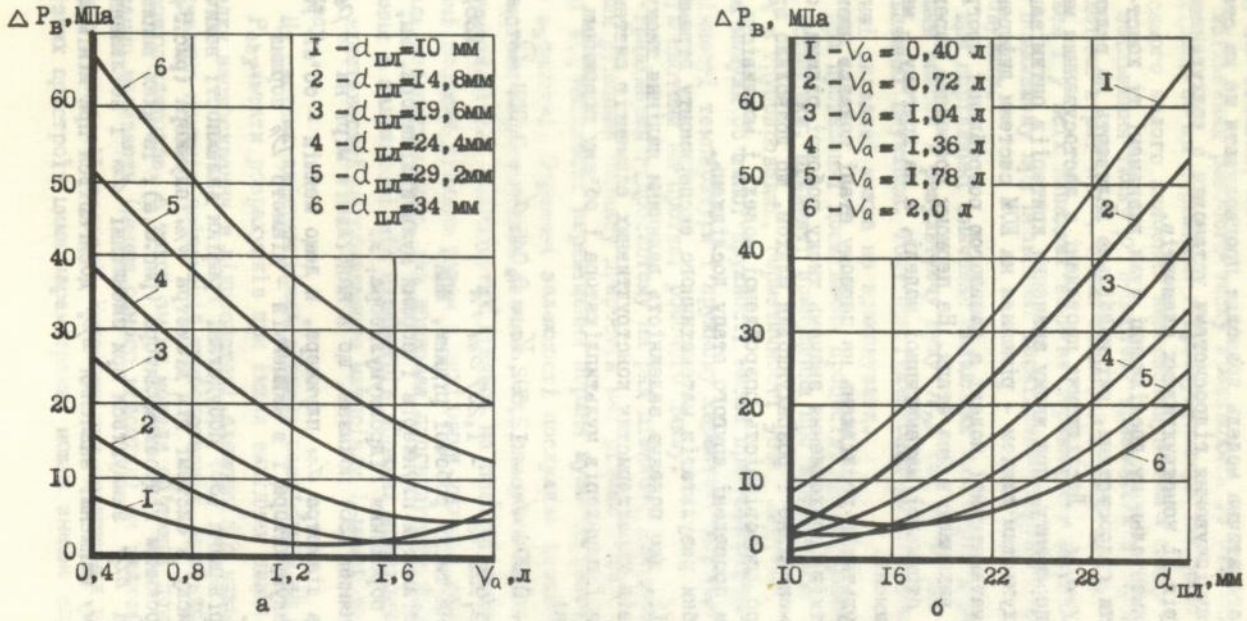

Рис.5. Графіки залежності величини падіння тиску $\Delta P_в$ в гідросистемі при реверсуванні поршня мультиплікатора від об'єма порожнини гідроакумулятора V_a (а) та діаметру плунжера $d_{пл}$ (б).

ній величині діаметра $d_{пл}$ і $V_a \rightarrow$ I,2 л.

Виходячи із допустимої частоти перемикань гідророзподільника, на основі отриманих графіків визначені раціональні значення параметрів елементів гідросистеми. Так, було встановлено, що при заданих значеннях $p_в$ = 250 МПа і діаметрі d_c = 0,2 мм вихідного отвору сопла раціональні параметри елементів гідросистеми установки мають слідуючі величини: $d_{пл}$ = I5-I7 мм, V_a = I,5-I,7 л.

Діаметр $D_п$ поршня прийнятий рівним I25 мм, виходячи з того, що при такому його значенні забезпечується мінімальне значення $\Delta p_в$ і необхідний коефіцієнт мультиплікації.

Ефективність процесу гідрозізання в значній мірі залежить від форми каналу струменеформуючого сопла. Для пошуку раціональної форми каналу були проведені дослідження умов формування в ньому струменя.

Плин рідини в замкненій зоні звичайно описується системою диференційних рівнянь, аналітичне рішення яких є тільки для окремих випадків.

Враховуючи складність рішення цих рівнянь, їх дещо спрощують, вводячи певні припущення. Аналіз припущень, що застосовують в гідродинаміці, дозволив подати фізичну модель процесу у вигляді плину в приграничному шарі і ядрі потоку, причому останнє показано як потенційно стаціонарний плин ідеальної нестискової рідини.

Враховуючи ці припущення, плин рідини в сопловому насадку (ядрі потоку) можна описати в циліндричних координатах x , r рівнянням функції потоку ψ для нестискової рідини:

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} - \frac{1}{r}\frac{\partial\psi}{\partial r} + \frac{\partial^2\psi}{\partial r^2} = 0 \qquad (37)$$

Перевагами такого опису є можливість визначення компонентів вектора швидкості:

$$u = \frac{1}{r}\frac{\partial\psi}{\partial r} \; ; \quad v = -\frac{1}{r}\frac{\partial\psi}{\partial x} \; , \qquad (38)$$

де u , v - відповідно компоненти вектора швидкості по осям x, r.

В зоні рішення D (рис.6,а) рівняння (37) граничні умови для приведеної функції потоку матимуть вигляд:

$$\psi|_{r=0} = 0; \qquad \psi|_{r} = f(x) = 1,0$$

$$\frac{\partial\psi}{\partial x}|_{x=-1,0} = 0; \; \frac{\partial\psi}{\partial x}|_{x=1,0} = \frac{r}{R_c} f'(x)\frac{\partial\psi}{\partial r} \; ,$$

(39)

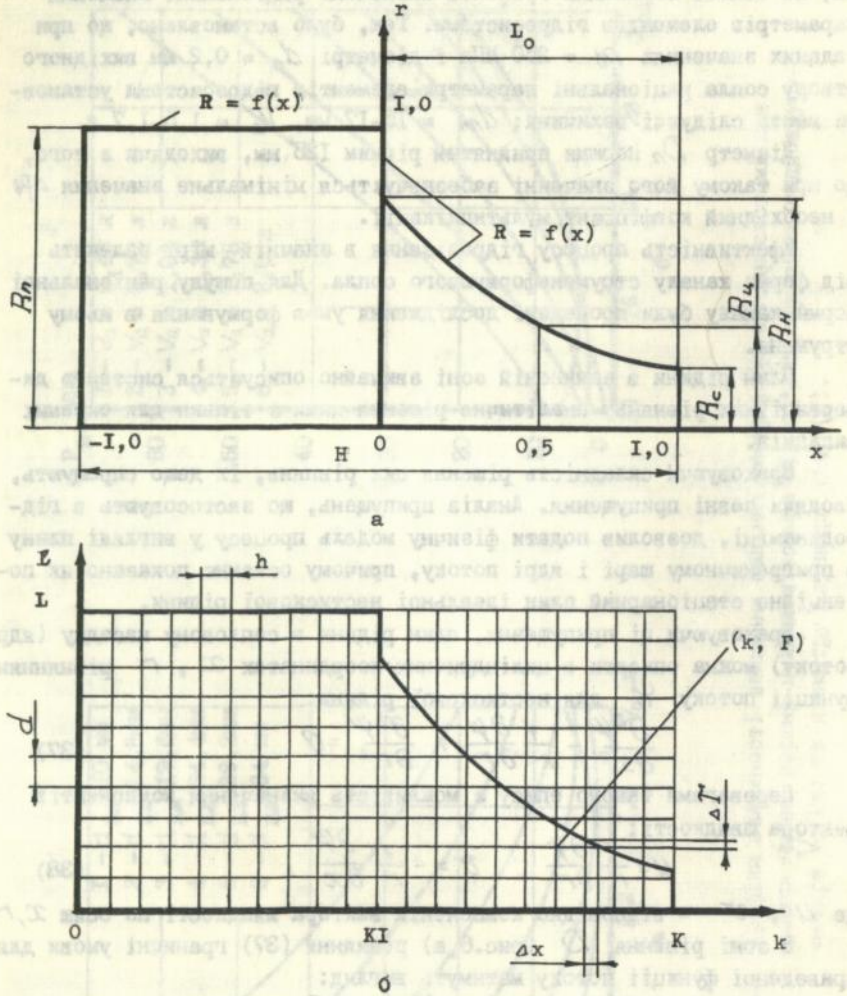

Рис.6. Зона рішення $\mathcal{D}$ (а) і сіткова зона $\mathcal{D}_1$ (б) для рівнянь, які описують плин рідини в сопловому насадку.

де R_c - радіус вихідного перерізу сопла (x = I,0);
$f'(x)$- похідна по x функції, яка описує профіль каналу.

Для розв'язання рівняння (37) з граничними умовами (39) побудовані рівномірні прямокутні сітки ω_x з кроком h і ω_r з кроком d в зоні D_1 $\{ -I,0 \le x \le I,0;\ 0 \le r \le R_H \}$ (рис.6,б):

$$\omega_x = \{ x(k) = x_k ;\ k = 0,1,2,\dots,K,\ h \cdot K = H \},$$

$$\omega_r = \{ r(l) = r^l ;\ l = 0,1,2,\dots,L,\ d \cdot L = R_H \}$$

Після апроксимації кінцевими відмінностями рівняння (37) отримана система сіткових рівнянь:

$$\psi_k^l = \begin{cases} \dfrac{A(\psi_{k+1}^l + \psi_{k-1}^l) + B^l \psi_k^{l+1} + C^l \psi_k^{l-1}}{3 - 4A} \\ \qquad \dfrac{2A\psi_{k+2}^l + 3B^l \psi_{k+1}^{l+1} + 3C^l \psi_{k+1}^{l-1}}{3-4A}, & k = 0, \\ \dfrac{4\psi_{k-1}^l - \psi_{k-2}^l - pRl(\psi_k^{l+1} - \psi_k^{l-1})}{3}, & k = K, \\ 1 + \Delta x \dfrac{\psi_{k-1}^l - 1}{h + \Delta x}, & k = \Gamma,\ l < \Gamma, \\ 1 + \Delta r \dfrac{\psi_k^{l-1} - 1}{d + \Delta r}, & l = \Gamma, \end{cases} \qquad (40)$$

де $A = \dfrac{d^2}{2(d^2+h^2)}$; $B^l = \dfrac{h^2}{4(d^2+h^2)}\left(2 - \dfrac{1}{l}\right)$;

$$C^l = \frac{h^2}{4(d^2+h^2)}\left(2 + \frac{1}{l}\right),\ PR = \frac{R_{k-2} - 4R_{k-1} + 3R_k}{2R_k} ;$$

Г - номер граничного вузла; R_k - радіус каналу в перерізі, який проходить через вузли сітки з K -ми номерами.

Розв'язання даної системи отримано при допомозі ЕОМ методом ітерацій. Для прискорення збіжності ітераційного процесу застосована схема прискореного методу Лібмана, відповідно з якою

$$\Psi = \beta \Psi^N + (1-\beta)\Psi^{N-1} ; \qquad (4I)$$

де β - коефіцієнт, що дорівнює I,5-2,I;

ψ^{N}, ψ^{N-1} – значення функції потоку, що обчислені в останній і попередній ітераціях.

Як початкове наближення прийняте значення функції потоку для рівномірного прямолінійного плину рідини в циліндричному каналі:

$$\psi^{0} = 0{,}5\,u R_{к}^{2}, \qquad (42)$$

де u – швидкість плину рідини в каналі.

Компоненти вектора швидкості визначені за відомими значеннями функції потоку у вузлах сіток апроксимацією співвідношень (38) у відповідних вузлах сіток.

Отримане таким чином просторове поле швидкостей рідини дало можливість зробити висновок про плавність плину, визначити витрату рідини, що витікає із сопла, з врахуванням перерозподілу швидкостей в вихідному перерізі і розрахувати приграничний шар.

Реальна витрата рідини, що витікає із сопла, визначена шляхом зменшення радіуса вихідного перерізу сопла на величину товщини витискання δ^{*}, тобто інтегральну характеристику приграничного шару, яка характеризує втрату маси рідини за рахунок зменшення швидкості потоку в приграничному шарі.

Для визначення товщини витискання використали рівняння імпульсів для осесиметричного витікання рідини:

$$\frac{d\delta^{**}}{dy} + \frac{\delta^{**}}{W}\frac{dW}{dy}(H+2) + \frac{\delta^{**}}{r_0}\frac{dr_0}{dy} = \frac{C_f}{2}, \qquad (43)$$

де δ^{**} – товщина втрати імпульсу;

y – криволінійна координата, збіжна з профілем каналу;

W – швидкість набігаючого потоку;

$H = \delta^{*}/\delta^{**}$ – формопараметр;

r_0 – радіус перерізу обтічного тіла;

$C_f = 2\tau_0/(\rho W)$ – місцевий коефіцієнт поверхневого тертя;

τ_0 – дотичні напруги;

ρ – щільність рідини.

Розв'язавши рівняння (43) відповідно δ^{**} і враховуючи, що приграничний шар визначається на внутрішній, а не на зовнішній поверхні тіла обертання, отримали:

$$\delta^{**} = \frac{0{,}037\,\nu^{0{,}25}}{W^{3{,}29}}\left(\frac{\int_0^{y}(R_{н}-R_{к})W^{0{,}86}\,dy}{R_{н}-R_{к}}\right)^{0{,}8} \qquad (44)$$

Тому що формопараметр $H = \delta^{*}/\delta^{**} = 1{,}29$

$$\delta^{*} = 1{,}29\,\delta^{**} \qquad (45)$$

Обчислені за приведеними залежностями величини дозволили по коефіцієнту витрати μ оцінити ефективність сопла

$$\mu = Q_p / Q_т \quad , \tag{46}$$

де Q_p - реальна витрата рідини, що витікає із сопла з врахуванням перерозподілу швидкості і товщини витискання в вихідному перерізі;

$Q_т$ - теоретична витрата рідини.

$$Q_т = \pi R_c^2 u_{oc} \tag{47}$$

де u_{oc} - швидкість рідини на осі сопла.

Приведені залежності вирішені методом кінцевих відмінностей з допомогою розробленої для ЕОМ програми, яка дозволяє визначити у вузлах сітки і на профілі струменеформуючого каналу значення функції потоку, складові поля швидкостей, інтегральні характеристики приграничного шару, витрату рідини і коефіцієнт витрати.

При розрахунках плину рідини в соплових насадках методом математичного планування експерименту визначені основні фактори, що впливають на хід процесу, тиск в системі, профіль і довжину струменеформуючого каналу сопла. Оскільки профіль каналу в значній мірі визначає струменеформуючу здатність сопла, розглянуті найбільш часто застосовувані - коноідальний, Вітошинського, гіперболічний, експоненційний і катеноідальний. Проведений аналіз параметрів плину рідини дозволив за вихідний профіль при дослідженнях вибрати катеноідальний. Проте залежність, що описує цей профіль, не дає можливості пошуку оптимального співвідношення розмірів каналу, тому що для кожної пари значень вхідного $R_н$ і вихідного R_c радіусів можна побудувати тільки один профіль з незмінним радіусом $R_ц$ центрального перерізу. Для досліджень був узятий профіль каналу, близький до катеноідального, і вибрана апроксимуюча залежність, що описує цей профіль.

$$R = f(x) = Exp(A + Bx + Cx^2), \tag{48}$$

де A, B, C - параметри експоненціальної залежності.

З використанням розробленої програми на ЕОМ СМ-1420 розраховані параметри плину рідини у всьому досліджуваному інтервалі. Розрахунки проведені на прямокутній рівномірній сітці 33x216 (K = 1,2...33; ℓ = 1,2...216) з сталим для всіх профілів кроком ω_r сітки, d = 10 мкм і кроком ω_x сітки, який змінюється в залежності від довжини сопла (довжина сопла поділена на 20 рівних частин, тобто $h = L_o/20$).

Аналіз отриманих залежностей показав, що: неплавність профілю сопла викликає пульсації і зміни напрямку вектора швидкості;

підвищення тиску (швидкості витікання) призводить до зменшення товщини витискання;

при збільшенні довжини сопла зменшується нерівномірність швидкості на зрізі сопла і збільшується товщина витискання;

при збільшенні радіуса центрального перерізу підвищується нерівномірність розподілу швидкостей в перерізах, а положення мінімуму в розподілі товщини витискання зміщується до вихідного перерізу.

Обробка на ЕОМ результатів числового експерименту дозволила отримати рівняння регресії, де за функцію відгуку обрано коефіцієнт μ витрати. Із рівняння регресії визначені раціональні розміри радіуса центрального перерізу $R_ц$ і довжини L_o струменеформуючого сопла для вихідних радіусів R_c від 50 до 150 мкм. При цьому отримані апроксимаційні залежності:

$$R_ц = 80{,}8 + 1{,}72\,R_c \text{ (мкм)}, \qquad L_o = 1076{,}5 + 0{,}37\,R_o \text{ (мкм)} \quad (49)$$

Дослідження ефективності струменеформуючих сопел різних конструкцій показало, що розроблені сопла забезпечують як більш високу витрату рідини, так і більш високу продуктивність процесу.

На основі проведених досліджень розроблена конструкція гідрорізної установки, яка дозволяє різати матеріали широкого спектру. Враховуючи рекомендації, отримані в результаті оптимізації конструктивних параметрів, діаметр плунжерів установки прийнято рівним 16 мм, а діаметр поршня - 125 мм.

При оптимізації основних конструктивних і технологічних параметрів установки отримані рівняння регресії, що описують залежність продуктивності процесу гідрорізання від тиску рідини перед соплом, діаметра вихідного отвору струменеформуючого сопла, відстані поміж зрізом сопла і поверхнею матеріалу, а також кута нахилу струменя.

На основі проведених експериментів розроблені технічні вимоги на струменеформуючі сопла, в яких є всі необхідні дані для їх розрахунку і виготовлення. В результаті проведених розрахунків показано, що для широкого спектру матеріалів при швидкості подачі до 2,5 м/хв можна обмежитися двома типорозмірами сопел: при діаметрі вихідного отвору d_c = 0,15 мм - для розкрою матеріалів товщиною до 15 мм і границі міцності на розтяг до 10 мПа і при d_c = 0,20 мм - для розкрою більш міцних матеріалів і багатошарових настилів.

Для оптимізації конструктивних параметрів абразивно-струменевої головки проведені експериментальні дослідження процесу гідро-

абразивного різання. Оскільки швидкість абразивної частки у вирішальній мірі визначає руйнівну спроможність двофазного струменя, то при проведені досліджень відібрані найбільш суттєві фактори, які впливають на швидкість гдроабразивного струменя - тиск p робочої рідини в системі, довжина L прискорюючого насадка, діаметр d його каналу і витрата M_a абразивного матеріалу.

Результати багатофакторного експерименту оброблені з допомогою ЕОМ-1022 і представлені у вигляді регресивної залежності:

$$S_n = 119,10 - 0,22p + 0,5M_a + 0,33L - 112,29d + 0,03p^2 - 0,002M_a^2 - 0,08L^2 + 30,9d^2 + 0,002pM_a + 0,005pL - 0,29pd - 0,001M_aL + 0,07M_ad \quad (50)$$

Враховуючи значну складність створення аналітичного опису процесу, що розглядається, і відсутність даних для проектування, запропонована регресивна залежність вже на сьогоднішнім етапі може бути використана для інженерних розрахунків і визначення параметрів, які дозволяють експлуатувати устаткування в оптимальному режимі.

Отримані результати досліджень використані для розрізування матеріалів гідро і гідроабразивним способом на підприємствах різних галузей промисловості.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В результаті проведених аналітичних та експериментальних досліджень, апробації в умовах виробництва технологічного процесу та устаткування для гідро або гідроабразивного різання вирішено наукову проблему, яка має важливе народногосподарське значення в галузі обробки матеріалів різанням, і досягнуто поставленої в дисертаційній роботі мети.

Розроблено наукові основи конструювання гідрорізного устаткування, оптимізовано режими різання на основі аналітичної моделі продуктивності процесу, сформульовано рекомендації по зменшенню пульсацій робочого тиску при функціюванні гідросистеми установки, проаналізовано результати досліджень плину рідини в струменеформуючому соплі, що дозволило вже на стадії проектування одержати раціональні параметри устаткування, що забезпечують продуктивне і якісне різання матеріалів.

Проведені дослідження дозволили сформулювати такі висновки:

1. Для ефективного розрізання матеріалів з різними фізико-механічними та технологічними властивостями доцільно використовувати енергію високошвидкісного (V = 400-900 м/с) гідро або гідроабразивного струменя, сформованого в соплах з діаметром вихідного

отвору від 0,1 до 0,3 мм при тиску в системі від 80 до 400 МПа.

2. Під впливом дії високошвидкісного струменю рідини на матеріал виникає локальна деформація, а в зоні найбільших розтягуючих і дотичних напружень зароджуються мікротріщини, що приводять до руйнування матеріалу. Зародження тріщин починається на межі пружної та пластичної зон при напруженнях, що перевищують тимчасовий опір матеріалу на розтяг. При цьому в матеріалах з коефіцієнтом Пуассона від 0,35 до 0,50 глибина зародження тріщин дорівнює 0,6-0,7 діаметра вихідного отвору струменеформуючого сопла.

3. Для розрахунку напруженого стану матеріалу під впливом гідроструменю можуть використовуватись методи прикладної теорії пружності.

4. Продуктивність процесу гідрорізання пропорційна тиску робочої рідини та вихідному перерізу каналу струменеформуючого сопла, а оптимальна відстань від сопла до поверхні матеріалу, що обробляється, дорівнює довжині початкової (цільної) частини струменю і дорівнює (в залежності від величини тиску в системі) від 30 до 40 діаметрів вихідного отвору струменеформуючого сопла.

5. Характер функціювання гідрорізної установки при зміні її конструктивних елементів можна прогнозувати, використовуючи розроблену в дисертації модель її гідросистеми.

6. Зменшення коливань тиску рідини в системі підвищує стабільність витікання її з струменеформуючого сопла, і як наслідок, покращує якість обробки та збільшує продуктивність процесу. Збільшення робочого тиску приводить до зменшення коливань рідини в гідросистемі, в зв'язку з чим об'єм гідроакумулятора доцільно розраховувати при найменшому тиску, що використовується в технологічному процесі.

7. При підвищенні тиску в системі гідроустановки абсолютне значення зміни тиску Δp збільшується, в той час, як відносне значення $\Delta p/p$ зменшується і у всіх випадках (як в системі високого, так і низького тиску) не перевищує одного відсотка, в зв'язку з чим при розрахунках системи його можна не враховувати.

8. На величину коливань тиску рідини в системі найбільш впливає діаметр плунжера мультиплікатора, в меншій мірі - об'єм порожнини акумулятора і найменше - діаметр поршня мультиплікатора. При збільшенні діаметра плунжера коливання тиску збільшуються, при збільшенні об'єму порожнини акумулятора - зменшуються.

9. Мінімальний об'єм порожнини гідроакумулятора обумовлюється

максимально допустимим коливанням тиску робочої рідини в гідросистемі.

10. Точність розрахунку елементів гідросистеми установки для гідрорізання значно збільшується при врахуванні впливу стискання робочої рідини, гідравлічних втрат в трубопроводах та сил тертя в ущільненнях поршня та плунжера.

11. Раціональні параметри конструктивних елементів гідросистеми гідрорізної установки визначаються на стадії проектування виходячи з необхідності забезпечення мінімального зменшення тиску робочої рідини при реверсі поршня мультиплікатора. Для гідроустановок з тиском робочої рідини до 250 МПа і струменеформуючим соплом з діаметром вихідного отвору до 0,2 мм раціональні значення діаметра плунжера мультиплікатора - в межах 15-17 мм, діаметра поршня - 125 мм, об'єму порожнини акумулятора 1,5-1,7 л. Зменшення тиску рідини, зв'язане з реверсом поршня мультиплікатора, на всіх етапах функціювання гідросистеми не перевищує 2,8-4,2 МПа при тому, що частота реверсу не менше 1 $с^{-1}$.

12. Найбільшу частку в загальну силу тертя в системі вносять втрати в ущільненнях плунжерів мультиплікатора (до 96 %), в зв'язку з чим решту складових частин в інженерних розрахунках можна не враховувати.

13. Довжина каналу струменеформуючого сопла обумовлюється, з одного боку, достатністю для формування струменя рідини, а з другого - втратами енергії струменя на тертя об стінку каналу. В досліджуваному діапазоні тиску та швидкості плину рідини раціональна довжина L_o каналу знаходиться в межах 1710-1780 мкм.

14. Збільшення коефіцієнту витрати (виходу), що є критерієм ефективності сопла, досягається за рахунок забезпечення рівномірного розподілу швидкості руху рідини по довжині каналу та зменшення інтегральних характеристик приграничного шару.

15. Плавність профілю каналу та співвідношення розмірів радіусів середнього та вихідного перерізів каналу струменеформуючого сопла є переважаючими факторами при оптимізації параметрів плину рідини та витратних характеристик в сопловій головці гідрорізної установки. Коефіцієнт витрати струменеформуючих сопел з діаметром вихідних отворів від 0,1 до 0,3 досягає своїх максимальних значень (при тиску в системі від 100 до 250 МПа) при співвідношенні радіусів центрального та вихідного перерізів ($R_ц/R_c$) в межах від 2,2 до 3.

16. Раціональне значення параметрів струменеформуючих сопел

з діаметром вихідних отворів від 0,I до 0,3 мм визначається співвідношенням $R_ц = 80,8 + I,72\ R_c$, $\angle_б = I706,5 + 0,37\ R_c$ (мкм).

I7. На величину продуктивності процесу при гідроабразивній обробці матеріалів найбільший вплив має: тиск рідини в системі, витрата абразиву, довжина та діаметр прискорюючого насадку. При ранжируванні факторів з'ясувалось, що підвищення продуктивності процесу пропорційне збільшенню тиску в системі, а вплив решти факторів носить нелінійний характер і має екстремуми, що залежать від умов формування двохфазного гідроабразивного потоку та тиску в системі. В межах досліджуваних факторів максимальна продуктивність процесу досягається при витратах абразиву від 2,I до 2,9 г/с, довжині прискорюючого насадку від 50 до 80 мм та його діаметру від I,9 до 2,I мм.

I8. Використання запропонованих в роботі математичних та регресивних моделей дозволяє на стадії проектування провадити розробку гідрорізних установок з параметрами, що забезпечують розрізання матеріалів з різними фізико-механічними та технологічними властивостями.

I9. Для підвищення продуктивності та якості гідрорізної обробки запропонований спосіб та пристрої, що захищені авторськими свідоцтвами.

20. Впровадження наслідків досліджень при розробці гідрорізних установок на підприємствах різних галузей промисловості дозволило одержати реальну ефективність щорічно 600 тис.крб., очікувану - більш як 2 млн.крб. (в цінах I985 року).

Основний зміст дисертації викладено в публікаціях:

I. А.с. I496780 (СССР). Способ рассечения паренхиматозных органов/ В.С.Земсков, М.В.Злой, И.В.Петко,- Опубл.БИ № 28, I989.

2. А.с. I433660 (СССР). Способ резания высокоскоростной струей жидкости/ И.В.Петко, С.В.Беляев, Б.Г.Кедровский, Ю.В.Клапцов, В.А.Слободянюк. -Опубл. БИ № 40, I988.

3. А.с. I336325 (СССР). Сопло для получения режущей струи жидкости/ И.В.Петко, С.В.Беляева, Б.Г.Кедровский.- Опубл.БИ № 33,I987.

4. А.с. I409420 (СССР). Насадка сопла / И.В.Петко, Б.Г.Кедровский, С.В.Беляев, Ю.В.Клапцов и др.- Опубл.БИ № 26, I988.

5. А.с. I4I2892 (СССР), Сопловой насадок / И.В.Петко, С.В.Беляев, Б.Г.Кедровский, Ю.В.Клапцов, и др.- Опубл. БИ № 28,I988.

6. Бобровников Г.А., Петко И.В., Скирденко О.И. Установка для обработки литьевых и пленочных полимерных материалов струей жидкости высокого давления // Полимерные материалы в машиностроении. Технология производства и область применения.- К.: Знание, I976.- С.35-36.

7. Бобровников Г.А., Петко И.В., Скирденко О.И. К вопросу о перспективных направлениях обработки полимерных материалов // Сб.статей. Исследование и конструирование бытовых машин и приборов. - К.: Техника, I977. --С.8I- 84.

8. Беляев С.В., Петко И.В. К расчету профиля канала струеформирующего сопла гидрорезной установки высокого давления // Изв.вузов. Технология легкой пром-сти.- I988, № 3.- С.I03-I06.

9. Беляев С.В., Петко И.В. Математическое моделирование течения жидкости в сопловом насадке гидрорезной установки // Изв.вузов. Технология легкой пром-сти.- I989, № 3.- С.I2I-I25.

I0. Качество продукции автоматизированного машиностроительного производства/ А.С.Зенкин, И.В.Петко, Н.П.Стародуб, В.Д.Мельниченко.- Киев; Техника, I988.- I76 с.

II. Кедровский Б.Г., Петко И.В. Экспериментальное исследование производительности процесса раскроя некоторых полимерных материалов струей жидкости высокого давления // Изв.вузов. Технология легкой пром-сти.- I987, № 6.- С.I24-I26.

I2. Мельниченко В.Д., Беляев С.В., Петко И.В. Методика определения совместимости материалов трибоэлементов при высоких скоростях скольжения// Сб.трудов. Проблемы трения и изнашивания. К.: Техника, I99I.- С.33-38.

I3. Петко И.В., Пискорский Г.А., Слободянюк В.А. К расчету

аккумуляторов гидрорезных установок//Изв.вузов. Технология легкой пром-сти.- 1989.- № 1.- С.98-102.

14. Петко И.В., Слободянюк В.А. Аналитическое исследование состояния системы низкого давления гидрорезной установки во время переключения гидрораспределителя. Сообщение 1// Изв.вузов. Технология легкой пром-сти.- 1989.- № 4.- С.108-112.

15. Петко И.В., Слободянюк В.А. Аналитическое исследование состояния системы низкого давления гидрорезной установки во время переключения гидрораспределителя. Сообщение 2.//Изв.вузов. Технология легкой пром-сти.- 1989.- № 5.- С.125-127.

16. Петко И.В., Слободянюк В.А. Математическое моделирование рабочего цикла гидросистемы установки для разрезания материалов высокоскоростной струей жидкости./Киевский технол.инст.легкой пром-сти.- К.: 1989.- 52 с./ Рук.деп. в УкрНИИНТИ 17.12.1989, № 2957-Ук89.

17. Петко И.В., Слободянюк В.А. Разработка установки для резания листовых материалов высокоскоростной струей жидкрсти: Тезисы докл. на Всесоюзной научно-техн.конф. "Разработка и промышленная реализация новых механических и физико-химических методов обработки" /Обработка-88/.- М.: МВТУ им.Н.Баумана.- 1988.- С.79-80.

18. Петко И.В., Пискорский Г.А., Слободянюк В.А. Определение хода поршня в гидромультипликаторе //Изв.вузов. Технология легкой пром-сти.- 1989.- № 2.- С.110-114.

19. Петко И.В., Чернявский И.Д. Моделирование процесса разрушения материала непрерывной высокоскоростной струей жидкости// Изв. вузов, Технология легкой пром-сти.- 1991.-№ 2.№ С.123-128.

20. Петко И.В., Слободянюк В.А. Обеспечение стабильности истечения струи жидкости за счет выбора рациональных параметров гидрорезной установки//Изв.вузов. Технология легкой пром-сти.- 1992.- № 5.- С.92-95.

21. Петко И.В., Клапцов Ю.В., Слободянюк В.А. Экспериментальное исследование интенсивности гидроабразивного резания листовых материалов // Изв.вузов.Технология легкой пром-сти.- 1988.- № 5.- С.114-117.

22. Петко И.В., Клапцов Ю.В., Слободянюк В.А. Экспериментальное исследование интенсивности гидроабразивного резания листовых материалов //Изв.вузов. Технология легкой пром-сти.- 1988.- № 6.- С.102-104.

23. Петко И.В., Клапцов Ю.В. Разработка устройства для гидро-

абразивной резки.//Изв.вузов. Технология легкой пром-сти.- 1990.- № 5.- С.117-121.

24. Петко И.В., Скирденко О.И., Пономарев Ю.А. Использование математических методов планирования экспериментов при изучении силовых зависимостей процесса гидрорезания листовых полимерных материалов //Технология и организация пр-ва.- 1977.- № 3.- С.7-16.

25. Петко И.В., Кедровский Б.Г. Моделирование процесса резания неметаллических материалов гидроструей высокого давления // Изв.вузов. Технология легкой пром-сти.- 1987.- № 4.- С.127-131.

26. Петко И.В., Беляев С.В., Кедровский Б.Г., Клапцов Ю.В. Разработка и исследование установки для раскроя материалов гидроструей высокого давления /УкрНИКТИбыт.- К.: 1987.- 7 с.- Библиогр.: С.7.- Деп.в ВИНИТИ, 1988, № 161.

27. Петко И.В. Резание полимерных материалов высокоскоростной гидроструей: Сб.статей. Электробытовые машины и приборы.- К.: Техника, 1977, - С.7-13.

28. Петко И.В., Клапцов Ю.В., Кедровский Б.Г. и др. Разработка и исследование установки для раскроя материалов гидроструей высокого давления /ЦНИИбыт.- М.: Деп.в ЦБНТИ МБОН РСФСР 25.08.88, № 161-88.- 7 с.

29. Петко И.В., Беляев С.В., Клапцов Ю.В. Исследование оптимальных параметров сопел для формирования режущей струи жидкости /ЦНИИбыт.- М.: Деп.в ЦБНТИ МБОН РСФСР 25.08.88, № 171-88.- 8 с.

30. Скирденко О.И., Петко И.В. Выбор рабочей жидкости для гидрорезания листовых полимерных материалов//Сб.статей. Новое в разработках и исследованиях электробытовых машин и приборов.- К.: Техника, 1978.- С.58-60.

31. Петко І.В., Клапцов Ю.В., Беляєв С.В. Формування гідроабразивного потоку - ефективний спосіб підвищення продуктивності розкрійного процесу//Легка промисловість.- № 3.- К., 1988.- С.28-29.

32. Petko I., Kedrowsky B. Experimental investigation of some polimer materials cutting productivity with high speed liquid jet. // International Polimer Science and Technology, N1, 1989.

Ав 27.226

Друк. НИИ "Квант". Зам. 345. Т. 100. 04.-93.