

УДК 641.512

**СТРУКТУРА І ДИНАМІКА СТРУМЕНЯ ГІДРОМ'ЯСОРИЗКИ**

Погребняк А.В., аспірант\*,

Заплетніков І.М., д.т.н.

*Донецький національний університет економіки і торгівлі  
імені Михайла Туган-Барановського*

Тел/факс (062) 342973/304-83-16

**Анотація** - робота присвячена вивченню особливостей структури і динаміки струменя води, який є ріжучим інструментом. Показано яким чином характеристики гідроструменя пов'язані з ефективністю різання м'яса, яке має низьку температуру.

**Ключові слова** - гідрострумень, автомобельна течія, м'ясо глибокої заморозки, глибина щілини, сила впливу на перешкоду.

У сучасний час велика увага приділяється створенню ефективних засобів різання харчових продуктів глибокої заморозки. Одним з рішень зазначеної проблеми є використання устаткування для гідродинамічного різання харчових продуктів [1-4]. Технологія гідрорізання є перспективною для харчової промисловості, особливо для розрізання продуктів харчування, що мають температуру нижче 0°C і аж до мінус 195,8 °C - температури кипіння рідкого азоту, тому що традиційними методами при таких температурах це зробити неможливо.

**Основна задача даної роботи**, складала у встановленні особливостей структури і динаміки тонкого водяного струменя високого тиску, знання яких необхідно при розрахунках раціональних параметрів гідром'ясорізки.

У роботі [8] була отримана гіперболічна залежність для визначення граничної автомобельної швидкості витікання вільного водяного струменя у вигляді:

Аналіз результатів роботи [4], а також наших даних, отриманих при дослідженні процесу гідрорізання м'яса глибокої заморозки [4, 6, 7] показує, що при значеннях тисків робочої рідини вище деякого граничного значення  $P > P_{\text{гран}}$ , витікання гідроструменя відбувається в автомобельному режимі. Це свідчить про те, що структура гідроструменя, насамперед початкової ділянки, а також

закономірність зміни діаметра факелу гідроструменя по його довжині залишаються незмінними при подальшому збільшенні тиску рідини перед соплом ріжучої голівки.

$$V_{\text{гран}} = \frac{10^3}{0,3d_0 + 3,5}, \quad (1)$$

де  $V_{\text{гран}}$  - граничне значення автомодельної швидкості витікання, м/с;  
 $d_0$  - діаметр сопла, мм.

Якщо скористатися добре відомою формулою для швидкості витікання рідини з короткого капіляра-сопла [9] і, для зручності, прийняти щільність води (тому що в якості робочої рідини використовувалася вода) рівною  $1000 \text{ кг/м}^3$ , то одержуємо більш зручну для виконання розрахунків залежність:

$$V_0 = 44\varphi\sqrt{\Delta P_0}. \quad (2)$$

Далі, підставивши вираз (2) у залежність (1), одержуємо наступну розрахункову формулу для визначення граничних значень тиску для автомодельного режиму витікання води із сопла:

$$P_{\text{гдд}} = \frac{10^3}{44 \cdot \varphi(0,3 \cdot d_0 + 3,5)^2}, \quad (3)$$

де  $P_{\text{гран}}$  - граничний тиск перед соплом голівки, яка формує струмінь води при автомодельному режимі витікання, МПа.

На рис. 1, використовуючи формулу (2) при значенні  $\varphi=0,98$  наведена залежність граничного тиску  $P_{\text{гран}}$ , коли починає реалізовуватися автомодельний режим витікання залежно від діаметра сопла ріжучої голівки. Видно, що при швидкісному коефіцієнті  $\varphi=0,98$  (висока якість), що залежить від якості виготовлення проточної частини ріжучої голівки, граничний тиск автомодельного режиму витікання води із сопла змінюється в межах від 38 МПа для діаметра отвору сопла 0,8 мм до 42,3 МПа для діаметра сопла 0,1 мм.

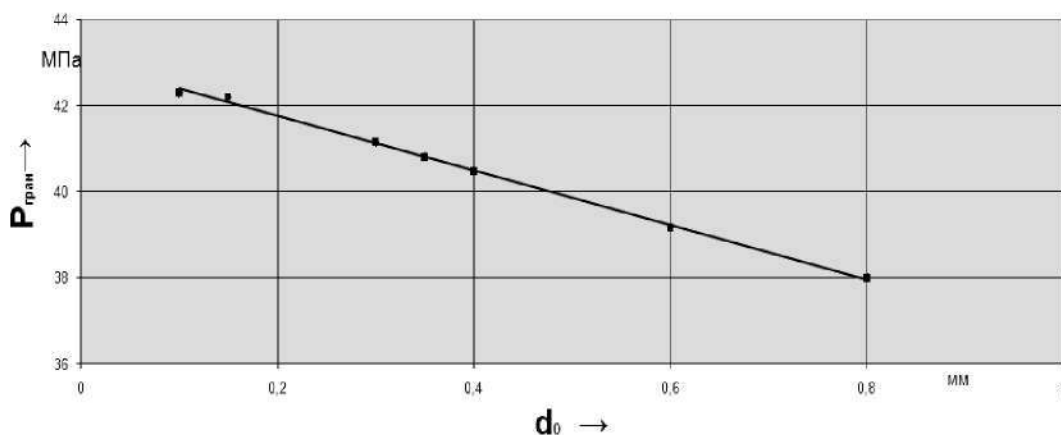


Рис. 1. Залежність граничного тиску автомодельного витікання водяного струменя від діаметру сопла

Раніше нами було встановлено [7, 10], що при тиску рідини нижче деякого значення, гідрострумінь нездатний нарізати щілини в м'ясі глибокої заморозки, тобто глибина різа м'яса практично дорівнювала нулю. Відстань між зрізом сопла ріжучої голівки і поверхнею м'яса, що розрізалось дорівнювала  $5 \cdot 10^{-3}$  м. Ця відстань відповідала максимальній глибині нарізання щілини у м'ясі, яке мало температуру мінус  $18^{\circ}\text{C}$  при тиску води перед соплом більше 50 МПа. Якщо порівняти граничні значення тиску робочої рідини, при яких виникає автотельний режим і здатність гідроструменя нарізати щілини в замороженому м'ясі, то спостерігається досить стійка кореляція, практично до повного збігу граничних значень тисків. Це вказує на те, що режими і параметри гідрорізання, а також продуктивність гідром'ясорізки, у першу чергу, залежать від структури гідроструменя і зміни його гідродинамічних параметрів.

Варто зазначити, що фізичний зміст автотельності [9] полягає в тому, що зі збільшенням тиску води перед соплом ріжучої голівки збільшується значення числа Рейнольдса  $Re$  на виході із сопла, яке показує співвідношення сил в'язкості і інерції в рідині. При досягненні умови, коли  $Re$  перевищує  $Re_{\text{гран}} = Re_a$  в'язкістю можна вже зневажити, тому що подальше збільшення тиску практично не впливає на структурні характеристики гідроструменя.

Отримані результати дозволяють стверджувати, що значення  $Re_{\text{гран}}$  є обмежуючим параметром з боку мінімального робочого тиску, починаючи з якого повинен відбуватися процес гідрорізання м'яса глибокої заморозки. Важливо також знати чим обумовлений обмежуючий параметр з боку максимального тиску. Максимально можливий тиск визначається, насамперед, тепловими ефектами в основних вузлах гідроструменевого устаткування. Якщо в якості робочої рідини використовується вода, то очевидно, що процес водорізання можливий тільки тоді, коли температура водяного струменя не буде перевищувати  $100^{\circ}\text{C}$ . Підвищення температури при дроселюванні стислої рідини виникає через ефект Джоуля-Томса [11]. Для рідин цей ефект мало вивчений і є негативний, що й спостерігається при витіканні рідин із сопла ріжучої голівки. Висновок про те, що підвищення температури гідроструменя обумовлено, головним чином, ефектом Джоуля-Томса, слідує з порівняння температури водяного струменя і струменів інших рідин. Порівняльний аналіз показує, що підвищення температури гідроструменя буде більше тоді, коли теплоємність робочої рідини менше. Температура струменя, наприклад, веретенного масла при певних умовах досягала понад  $200^{\circ}\text{C}$ . Діаметр сопла також впливає на температуру струменя і чим він менше, тим прояв ефекту підвищення температури гідроструменя є незначно слабкіший.

Дослідження ефекту Джоуля-Томса необхідно проводити окремо. Однак, навіть без детального експериментального вивчення цього ефекту, можна відповісти на важливе для конструктора питання, як далеко можна йти у бік підвищення тиску при розроблюванні устаткування для гідрорізання м'яса. Якщо не вживати ніяких спеціальних прийомів охолодження струменя [12, 13], то при тиску порядку 600-700 МПа для використовуваних нами сопел з діаметрами вихідних отворів 0,1-0,8 мм температура водяного струменя досягає значення 100 °С.

Експеримент показав [6, 7], що режим роботи і параметри гідрорізання, а також продуктивність м'ясорізки, ріжучим органом якої є тонкий струмінь води, безпосередньо залежать від структури (якості) струменя і зміни її гідродинамічних параметрів. Тому вивчення структурних змін, що відбуваються в струменях води від моменту їхнього вильоту із сопла в повітряне середовище до виродження в краплинний потік має велике значення для розуміння фізичних процесів гідродинамічного різання харчових продуктів. Одне з основних умов успішного застосування водяних струменів високого тиску для розрізання різних харчових продуктів - одержання при вильоті із сопла струменя з гарними гідродинамічними властивостями, що забезпечують достатню ефективність процесу гідрорізання.

Вивчення структури і динаміки тонкого струменя води, особливо надзвукового струменя, - одне з найбільш складних питань гідродинаміки. Через особливості руху водяного струменя в повітрі, а також відсутності необхідних вимірювальних апаратів характеристики цих струменів й їхня структура вивчені ще недостатньо. Однак, наявні результати досліджень струменів рідини [5, 8, 9] все ж таки дозволяють скласти загальне уявлення про ті процеси, які відбуваються при формуванні струменя води і її витіканні в атмосферу.

Високошвидкісний струмінь рідини на виході із сопла ріжучої голівки складається із суцільного струменя, що розширюється за певним законом і капілярного потоку із щільністю, яка в радіальному напрямку від осі струменя зменшується. Безпосередньо на виході з ріжучої голівки в струмені формується ядро постійних швидкостей конусоподібної форми, яке називають початковою ділянкою струменя (рис. 2). Протягом довжини початкової ділянки  $L_{\text{п}}$  у ньому має місце потенційна (безвихрова) течія рідини. При цьому значення швидкостей і динамічних тисків у всіх точках потенційного ядра струменя зберігають постійні значення:  $P_{\text{м}} = P_0 = \text{const}$ ;  $V_{L_{\text{п}}} = V_0 = \text{const}$  (тут  $P_0$  - тиск рідини в соплі, тобто перед циліндричною ділянкою сопла;  $P_{\text{м}}$  - осьовий динамічний тиск;  $V_0$  -

усереднене значення швидкості струменя на виході із сопла;  $V_{Lп}$  - осьова швидкість струменя протягом довжини початкової ділянки).

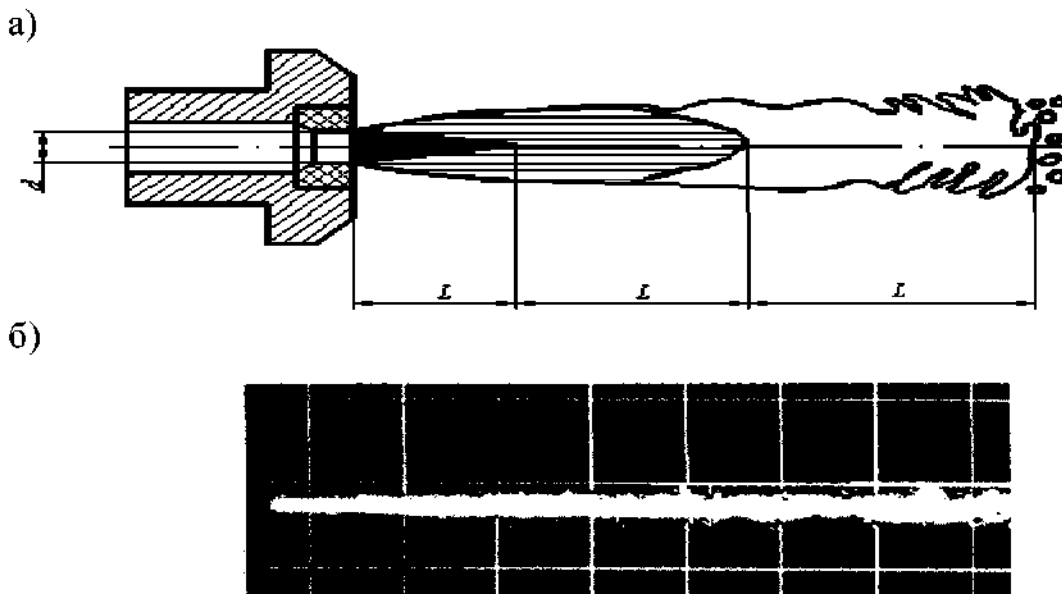


Рис. 2. Схема (а) структури гідроструменя і фотографія (б) водяного струменя, що витікає із сопла з діаметром 0,15мм при тиску 300 МПа

Під впливом надлишкового статичного тиску, турбулентних збурювань і виходу газоподібного компонента, що є присутнім у робочій рідині відбувається розширення струменя, яке викликає збільшення діаметру і зміну внутрішньої структури (рис. 2). Розширення струміння відбувається нерівномірно. На деякій частці початкової ділянки розширення струменя має більш інтенсивний характер. Далі кут розширення зовнішніх границь струменя приймає менше значення й стабілізується, а статичний тиск у струмені при цьому стає рівним атмосферному і подальше розширення струменя відбувається в основному за рахунок впровадження в струмінь все більшої маси повітря.

За межами початкової ділянки струменя в результаті її розширення і розпаду осьова подовжня швидкість і динамічний тиск поступово зменшуються по деякій гіперболічній залежності, а динамічний тиск і швидкість у перетині струменя різко знижуються по кривій Гауса від свого максимального значення до мінімального в граничній області. Ця ділянка струменя  $L_{осн}$  (за межами початкової ділянки  $L_{п}$ ), на якому струмінь зберігає високу щільність і компактність, називають основною ділянкою струменя; у її межах зберігається висока щільність струменя при низьких значеннях кута

розширення границь струменя. Початкова і основна ділянки в сумі становлять робочу ділянку струменя.

Технологічні можливості початкової і основної ділянок гідроструменя не однакові. Так, при різанні харчових продуктів глибокої заморозки, найбільш ефективна початкова ділянка струменя, розташована у безпосередній близькості від сопла, а для, наприклад, відділення м'яса від кістки і виконання деяких інших операцій - ефективність основної ділянки буде вище. Тому, розміри початкової ділянки високошвидкісного струменя рідини мають істотне значення при розробці технології гідрорізання м'яса. У першу чергу, від розмірів робочої ділянки гідроструменя буде залежати глибина щілини, що прорізається у замороженому м'ясі, природно, при тиску струменя рідини на одиницю поверхні різа, який перевищує межу міцності харчового продукту.

За межами робочої ділянки гідрострумінь втрачає стійкість і набуває хвилястої форми. На його поверхні утворюються нерівності у вигляді хвиль, форма й довжина яких змінюються зі зміною умов витікання, і починають спостерігатися все більш інтенсивні викиди рідини. Цю ділянку гідроструменя  $L_{\text{пул}}$  називають пульсуючою. Надалі струмінь розділяється на окремі блоки, що піддаються все більш інтенсивному краплинному розпаду. Величини осьової швидкості і динамічного тиску на цій ділянці досить незначні і зі збільшенням відстані від сопла асимптотично наближаються до нуля. Ця ділянка гідроструменя в технології гідрорізання харчових продуктів є практично неробочою.

До тепер залишається, однак, повністю не з'ясованим характер зміни величини сили впливу гідроструменя залежно віддалення перешкоди від сопла. З цього приводу існують суперечливі точки зору. Одні дослідники вважають [14], що сила впливу струменя на перешкоду істотно зменшується зі збільшенням відстані від зрізу сопла. Інші вважають [14], що повна довжина гідроструменя може бути розбита на дві ділянки: початкову ділянку, де сила впливу струменя на перешкоду зростає й досягає (на деякій відстані від сопла) максимального значення, і наступну ділянку, на всій протязі якої ця сила зберігається незмінною.

Значний обсяг робіт з дослідження процесу різання матеріалів, в основному полімерних, струменями води високого тиску виконаний Тихомировим Р.А. [15]. Дослідження проводилися при тиску води перед соплом до 500 МПа, діаметрі отворів ріжучої голівки  $(0,1 - 0,4) \cdot 10^{-3}$  м, відстані від зрізу сопла до поверхні матеріалу, що розрізається  $5 \cdot 10^{-3}$  м і швидкості переміщення матеріалу відносно струменя води  $1,6 \cdot 10^{-3}$  м/с. Було отримано, що зі збільшенням діаметру сопла від  $0,1 \cdot 10^{-3}$  до  $0,4 \cdot 10^{-3}$  м глибина прорізання щілини в

матеріалі зменшується: для вініпласту в 2.85 рази, для гетинаксу в п'ять разів і для стеклотекстоліту у вісім разів.

У роботі [16] отримано, що при постійній швидкості подачі матеріалу (оргскла, гуми, фторопласта та ін.) оптимальна відстань від його поверхні до зрізу сопла залежить від тиску при якому відбувається витікання струменя і діаметра сопла. Зменшення діаметра сопла від  $0,3 \cdot 10^{-3}$  до  $0,1 \cdot 10^{-3}$  м приводить до збільшення глибини щілини, яка прорізається в матеріалі. Цей результат автори пояснюють тим, що зменшення діаметру сопла при постійному тиску витікання струменя призводить до зменшення площі матеріалу, яка піддається руйнівному навантаженню, що приводить до збільшення питомого тиску різання.

У той же час, отримані нами [6, 7, 10] експериментальні результати свідчать, що глибина прорізання щілини в харчовому продукті зростає зі збільшенням гідродинамічних параметрів гідроструменя і збільшенням діаметру сопла ріжучої голівки від  $0,15 \cdot 10^{-3}$  до  $0,8 \cdot 10^{-3}$  м.

Тому, досліди, які описані нижче, були нами поставлені з метою встановлення особливостей динаміки тонкого водяного струменя високого тиску, з'ясувавши які можна було б розібратися в наявних протиріччях експериментальних даних. Без усунення наявних протиріч, неможливо, як обґрунтувати фізичні закономірності механізму мікроруйнування в процесі гідрорізання, так і установити взаємозв'язок окремих явищ, що відбуваються при цьому, що необхідно для визначення максимальної продуктивності і якості різання м'ясорізки при різних технологічних параметрах.

Оцінка енергетичних можливостей струменя робилась за допомогою виміру сили впливу струменя води на сталеву перешкоду, на якій були закріплені тензодатчики, а також на мішень, яка була закріплена на фізичному маятнику масою 400 кг. Перешкода мішень була виготовлена зі сталевих (Ст3) листів з розмірами  $(220 \times 220 \times 3) \cdot 10^{-3}$  м, які мали отвори з діаметром  $16 \cdot 10^{-3}$  м по кутах. Між площиною мішені і тілом фізичного маятника був зазор  $5 \cdot 10^{-2}$  м. Силу впливу водяного струменя на перешкоду визначали по величині тензосигнала, а при роботі на імпульсному водометі по куту відхилення маятника.

Результати, що показують розвиток сили впливу гідроструменя на перешкоду по осі потоку в безрозмірних координатах представлені на рис. 3. Отримані експериментальні дані, описуються, принаймні, двома ділянками з лінійною зміною сили впливу гідроструменя на перешкоду. Із рис. 3 видно, що максимальне значення сили впливу гідроструменя на плоску перешкоду перебуває в інтервалі безрозмірних відстаней від сопла  $50 < L/d_0 < 100$ . Порівняння розподілу

сили впливу гідроструменя на перешкоду по осі потоку (рис. 3) з її структурними особливостями (рис. 2) показує, що область із  $L/d_0 < 50$  відноситься до початкової ділянки струменя, а  $50 < L/d_0 < 100$  - до основної ділянки.

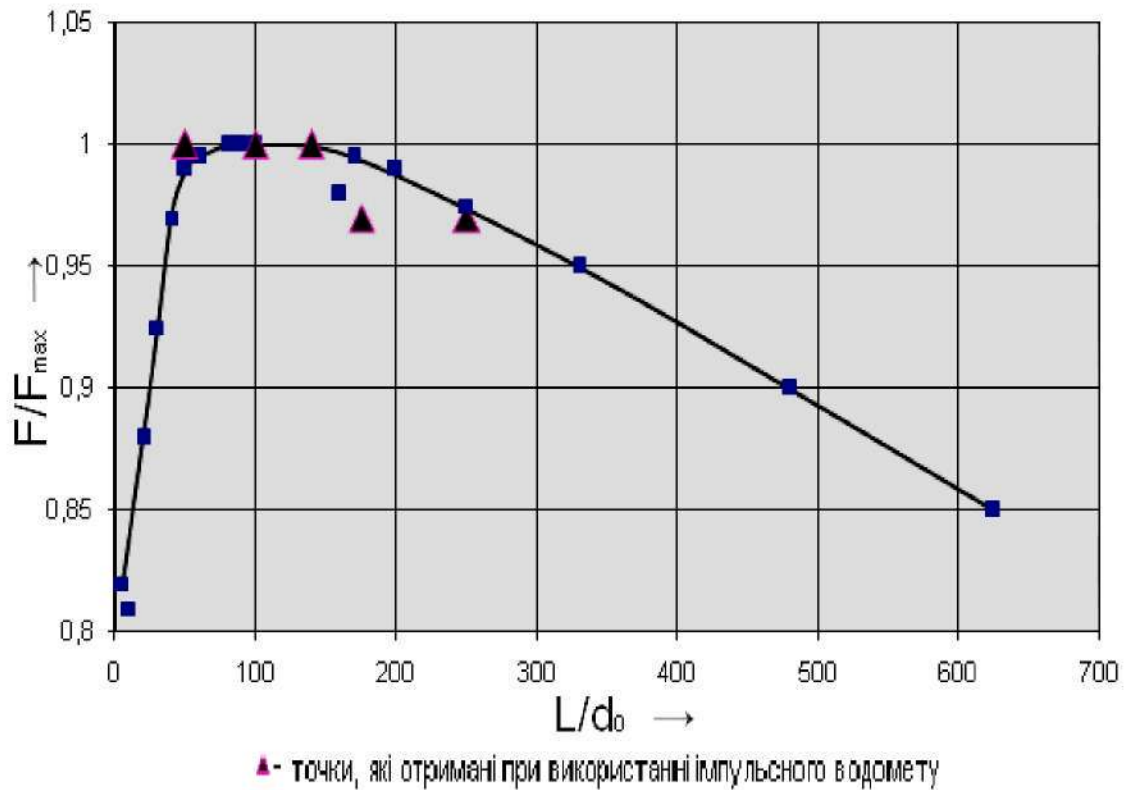


Рис. 3. Розподілення сили впливу гідроструменю на перешкоду по осі потоку

На рис. 3 наведені також точки, отримані з використанням імпульсного водомета. Опис імпульсного водомета можна знайти у роботі [17]. Водомет мав наступні характеристики: тиск води перед соплом – 450 МПа; середня швидкість струменя - до 350 м/с; діаметр струменя на зрізі сопла -  $10^{-2}$  м; тривалість пострілу -  $7,6 \cdot 10^{-2}$  с.

Дані дослідів представлені в таблиці 1 і на рис. 4, звідки видно, що максимальна відстань від водомета до мішені, коли ще спостерігається її пробій, становить 1,5 м, а при відстані 1,75 м спостерігається прогин без пробою.

Експериментальні дані з динаміки тонкого водяного струменя високого тиску цілком пояснюють характер зміни ріжучих властивостей гідроструменя залежно від відстані матеріалу, що розрізається до зрізу сопла. Стає зрозумілим чому в одних випадках глибина щілини, що прорізається зі збільшенням діаметру сопла збільшується, а в інших - зменшується. З огляду на дані рис. 3 приходимо до висновку, що якщо відстань від сопла до поверхні



харчового матеріалу, що розрізається менше розмірів початкової ділянки гідроструменя, то збільшення діаметру сопла буде приводити до зменшення глибини різь. Якщо ж відстань від сопла до поверхні харчового матеріалу, що розрізається наближається до розмірів основної ділянки гідроструменя, то тоді глибина різь буде зростати зі збільшенням діаметру сопла ріжучої голівки при незмінному перепаді тиску.

Таблиця 1 - Вплив відстані від зрізу сопла до мішені на характер взаємодії гідроструменя з мішенню

Номер досліджу (мішені)	Відстань до маятника (мішені), м	Середня швидкість струменя, м/с	Характер пробою мішені
1	0,5	255	Діаметр отвору $(18-20) \cdot 10^{-3}$ м, краї рвані
2	1,5	255	Діаметр отвору $(15-18) \cdot 10^{-3}$ м, краї рвані
3	1,75	250	Прогин без пробою
4	2,0	250	Нема пробою

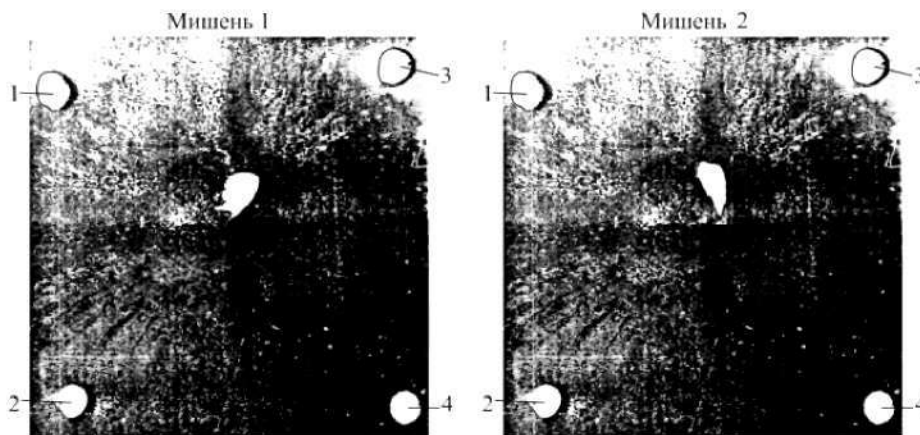


Рис. 4. Фотографії сталевих листів після взаємодії з високошвидкісним струменем води: 1, 2, 3, 4 - кріпильні отвори

Таким чином, отримані в даній роботі експериментальні дані підтверджують необхідність використання структурних і динамічних характеристик водяних струменів при встановленні раціональних параметрів гідром'ясорізки.

Перспективою подальших досліджень є встановлення залежностей для розрахунку структурних і динамічних характеристик гідроструменів від конструктивних параметрів головки, що формує ці струмені.

## Література

1. Пат. 40388 Україна, МПК (2009) A22C18/00, A22C25/00, B26D3/00. Спосіб різання харчових продуктів і матеріалів / Погребняк А.В., Гордієнко О.В. - №и 2008 11663, Бюл. №7. – 2009.
2. Пат. 30071 Україна, МПК (2006) B24C3/00. Пристрій для гідрорізання харчових матеріалів / Гордієнко О.В., Погребняк А. В. - №и 2007 11443, Бюл. №3. – 2008.
3. *Погребняк А.В.* Высокоэффективное гидрорезание твердых пищевых продуктов и материалов / А.В. Погребняк // Управление реологическими свойствами пищевых продуктов: сб. науч. матер. / Москов. гос. ун-т пищев. произв. – М., 2008. – С.173-179.
4. *Гордієнко О.В.* Гідрорізання в харчовому виробництві / О.В. Гордієнко, А.В. Погребняк, С.О. Фоменко // Обладнання та технології харчових виробництв: темат: зб. наук. праць / Донец. держ. ун-т економіки і торгівлі ім. М.Туган-Барановського. – Донецьк, 2007. – Вип.16. –С.26-31.
5. *Шавловский С.С.* Основы динамики струй при разрушении горного мас сива / С.С. Шавловський. – М.: Наука, 1979 – 174с.
6. *Гордієнко О.В.* Дослідження процесу водорізання харчових матеріалів і продуктів / О.В. Гордієнко, А.В. Погребняк // Обладнання та технології харчових виробництв: темат: зб. наук. праць / Донец. держ. ун-т економіки і торгівлі ім. М.Туган-Барановського. – Донецьк, 2008. – Вип.18. – С.280-287.
7. *Гордиенко А.В.* Влияние гидравлических параметров высокоскоростной струи на эффективность водорезания пищевых продуктов / А.В. Гордиенко, А.В. Погребняк // Перспективы пищевых технологий: темат. зб. науч. трудов / Одесская нац. акад. пищ. технол. – Одесса, 2009. –Вип.20. – С.148-153.
8. *Бафталовский В.Е.* О пороговых значениях скорости истечения водяных струй в автотомельном режиме / В.Е. Бафталовский. – Науч. тр. / ИГД им. А.А. Скочинского, 1982. – Вип. 207. С.84-92.
9. *Повх И.Л.* Техническая гидромеханика / И.Л. Повх. - Л.: Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 2-е изд. доп., 1976. – 504с.
10. *Гордієнко О.В.* Вплив твердості заморожених харчових продуктів на параметри процесу водорізання та водорізного обладнання / О.В. Гордієнко, А.В. Погребняк // Обладнання та технології харчових виробництв: темат: зб. наук. праць / Донец. держ. ун-т економіки і торгівлі ім. М.Туган-Барановського. – Донецьк, 2009. – Вип. 20. – С.148 - 153.
11. *Прохорович-Романов А.М.* Физический энциклопедический словарь / Гл. ред. А.М. Прохорович-Романов и др. – М.: Сов. энциклопедия, 1983. – 928с.

12. Пат. 46161 Україна, МПК (2009) В03В4/00. Спосіб різання харчових продуктів охолодженим струменем води / Погребняк А.В., Гордієнко О.В. – № и 2009 06318, Бюл. №23. – 2009.
13. Пат. 46163 Україна, МПК (2009) В03В4/00. Спосіб різання харчових продуктів охолодженим струменем води, що переривається / Заплетніков І.М., Погребняк А.В. – №и 2009 06333, Бюл. № 23. – 2009.
14. Рабинович Е.З. Гидравлика / Е.З. Рабинович. – М.: Недра, 1974. – 296с.
15. Тихомиров Р.А. Гидрорезание неметаллических материалов / Р.А. Тихомиров, В.В. Гуенко. – К.: Техника, 1984. – 150с.
16. Ступін О.Б. Розробка технології застосування гідроструменевого руйнування конструкційних матеріалів у техногенно-небезпечних умовах / О.Б. Ступін, П.В. Асланов, О.М. Семко та інші. – Звіт з НДР №0106U010798 / Дон. нац. ун-т – Донецьк, 2007. – 96с.
17. Атанов Г.А. Гидроимпульсные установки для разрушения горных пород / Г.А. Атанов. – К.:Вища школа, 1987. – 152с.

## СТРУКТУРА И ДИНАМИКА СТРУИ ГИДРОМЪЯСОРИЗКИ

Погребняк А.В., Заплетников И.М.

**Аннотация - работа посвящена изучению особенностей структуры и динамики струи воды, которая является режущим инструментом. Показано каким образом характеристики гидроструи связаны с эффективностью резания мяса, которое имеет низкую температуру.**

## STRUCTURE AND DYNAMICS OF THE JET OF HYDROMEAT-CUTTING MACHINE

A. Pogrebnyak, I. Zapletnikov

### *Summary*

**The features of structure and dynamics of the jet of hydro meat-cutting machine are established. It is shown how the features of the jet are connected with the meat-cutting efficiency in conditions of low temperatures. The necessity of using structural and dynamic features of water jets during the choice of rational parameters of hydromeat-cutting machines is proved.**