

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Дніпровський національний університет**  
**залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна**

---

Кафедра “Теплотехніка”

«ДО ЗАХИСТУ»  
Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Габрінець В.О.

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 р.

**ДИПЛОМНА РОБОТА**  
на здобуття ОС «Магістр»

Галузь знань **14 «Електрична інженерія»**

Спеціальність **144 «Теплоенергетика»**

Спеціалізація «Теплоенергетика»

**Тема «Дослідження взаємодії трансзвукових струмин газу з тупиковим каналом»**

**Theme «Study of the transonic gas jets interaction with a dead-end duct»**

Керівник магістерської роботи доц. \_\_\_\_\_ Перцевий В.О.

Нормоконтролер ст. викл. \_\_\_\_\_ Титаренко І.В.

Студент групи ТЕ 1921 \_\_\_\_\_ Гавриленко Т.М.  
Student Gavrilenko  
Tatyana

Дніпро  
2020

Дніпровський національний університет залізничного транспорту

імені академіка В.Лазаряна

Факультет: Управління енергетичними процесами

кафедра: Теплотехніка

Спеціальність: Теплоенергетика

---

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедрою

\_\_\_\_\_ В.О.Габрінець  
” \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2020 р.

ЗАВДАННЯ

до магістерської роботи студента

Гавриленко Тетяна Миколаївна

(прізвище, ім`я та по батькові)

1. Тема проекту (роботи): Дослідження взаємодії трансзвукових струмин газу з тупиковим каналом

---

---

---

---

---

затверджена наказом по університету № 93ст. від ”10”лютого 2020 р.

2. Термін подання студентом закінченого проекту (роботи) 05.12.2020 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи): Газодинамічні характеристики трансзвукових струмин та геометричні параметри тупикового каналу

---

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань до розробки) \_\_\_\_\_

1. Передумови використання трансзвукової газової струмини для охолодження прокату  
2. Математичне моделювання процесу взаємодії повітряної струмини з поверхнею зливка.  
3. Фізичне моделювання процесу взаємодії газової струмини з перешкодою.

---

---

---

---

---

5. Перелік креслень (з переліком обов`язкових креслень) \_\_\_\_\_

1. Схема твердіння безперервнолитого зливка. 2. Коефіцієнт тепловіддачі водоповітряних форсунок. 3. Схема взаємодії газової струмини з поверхнею зливка. 4. Етапи взаємодії струмини з тупиковим каналом. 5. Зміна структури початкової ділянки струмини в залежності від відстані до тупикового каналу. 6. Структура початкової ділянки імпульсної струмини. 7. Інженерне моделювання взаємодії газової струмини з тупиковим каналом. 8. Принципова схема експериментальної установки. 9. Результати експериментального дослідження взаємодії газової струмини з тупиковим каналом. 10. Характер взаємодії струмини з поверхнею зливка, що рухається. 11. Перевірка адекватності інженерного моделювання взаємодії струмини з тупиковим каналом.

6. Консультанти (з назвами розділів)

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Розділи I, II, III	Перцевий В.О.		

7. Дата видачі завдання 11.02.2020

Керівник магістерської роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_  
(підпис)

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ п/п	Назва розділу магістерської роботи	Термін виконання розділу (роботи)	Примітка
1	Передумови використання трансзвукової газової струмини для охолодження прокату	05.06.20	
2	Математичне моделювання процесу взаємодії повітряної струмини з поверхнею зливка	05.09.20	
3	Фізичне моделювання процесу взаємодії газової струмини з перешкодою	05.12.20	

Студент-дипломник \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник проекту \_\_\_\_\_  
(підпис)

## РЕФЕРАТ

Магістерська робота: 64 сторінок, 3 частини, 22 рисунок, 1 таблиця, 27 літературних джерел.

Об'єкт дослідження – процес повітряного охолодження зливка для установки неперервного розливання сталі.

Мета роботи – розробка ефективних режимів охолодження неперервнолитого зливка шляхом застосування повітряного способу охолодження.

В першому розділі обґрунтовано передумови використання трансзвукової газової струмини для охолодження прокату.

В другому розділі виконано математичне моделювання процесу взаємодії газової струмини з перешкодою.

В третьому розділі виконано фізичне моделювання газодинамічних та теплових процесів взаємодії газової струмини з перешкодою.

Одержані результати можуть бути використані при проектуванні зони вторинного охолодження неперервнолитих зливків.

Ключові слова: ЗОНА ВТОРИННОГО ОХОЛОДЖЕННЯ, СОПЛО, ТРАНСЗВУКОВА ГАЗОВА СТРУМИНА, СТРИБОК УЩІЛЬНЕННЯ, КОМПРЕСОР, ТУПИКОВИЙ КАНАЛ.

## ЗМІСТ

Вступ.....	
Розділ 1 Передумови використання трансзвукової газової струмини для охолодження прокату.....	
1.1 Кільцеві печі. Характеристика і призначення.....	
1.2 Особливості водоповітряного охолодження.....	
1.3 Принцип роботи ЗВО .....	
1.4 Теплообмін у ЗВО.....	
Розділ 2 Математичне моделювання процесу взаємодії повітряної струмини з поверхнею зливка.....	
2.1 Аналіз існуючих розв'язків задачі взаємодії газової струмини з перешкодою .....	
2.2 Розв'язання задачі математичного моделювання процесу взаємодії повітряної струмини з поверхнею.....	
Розділ 3 Фізичне моделювання процесу взаємодії газової струмини з перешкодою.....	
3.1 Послідовність проведення експериментальних досліджень.....	
3.2 Дослідження динамічних характеристик імпульсної газової струмини.....	
Висновки.....	
Перелік використаних джерел.....	

					025.150048.MP.2020.001			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Дослідження взаємодії трансзвукових струмин газу з тупиковим каналом	Літ.	Арк.	Акрушів
Розроб.	Гауриленко						5	
Керівник	Перцевий					ДНУЗТ, ТЕ 1921		
К. розділу	Перцевий							
Н. контр.	Титаренко							

025.150048.MP.2020.001

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Гавриленко			Літ.	Арк.	Акрушів
Керівник		Перцевий				5	
К. розділу		Перцевий			ДНУЗТ, ТЕ 1921		
Н. контр.		Титаренко					

Дослідження взаємодії  
трансзвукових струмин газу з  
тупиковим каналом

## ВСТУП

Охолодження неперервнолитого зливка у вторинній зоні охолодження загальноновизнано в сучасній світовій металургійній практиці в якості обов'язкової технологічної операції, яка забезпечує високу якість сталі, що виплавляється. В теперішній час існує ряд способів охолодження зливка, серед яких перевагу має охолодження зливка трансзвуковими газовими струминами завдяки усуненню необхідності очищення великих об'ємів води перед форсункою для запобігання її засмічення, а також запобігання формування міжкристалічних тріщин внаслідок різної щільності розподілу охолоджувальної води на поверхні зливка, що погіршує його якість.

Експериментальні та теоретичні основи застосування трансзвукових газових струменів для охолодження металу практично відсутні.

Дана робота присвячена дослідженню впливу геометричних і енергетичних характеристик імпульсної газової струмини та процесу його теплообміну з поверхнею зливка, а також режимів взаємодії струмини з поверхнею зливка на ефективність охолодження металу у вторинній зоні.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити наступні задачі:

- розробити інженерну модель течії неізотермічної газової струмини уздовж поверхні зливка при фронтальному і бічному натіканні на нього газової струмини;

- виконати фізичне моделювання взаємодії трансзвукової неізотермічної газової струмини з поверхнею зливка, що охолоджується.

На основі аналізу експериментальних даних визначено характер взаємодії струмини газу з тупиковим каналом, що імітує рядне розташування сопел в системі вторинного охолодження.

З використанням інженерної моделі натікання трансзвукової неізотермічної газової струмини на тупиковий канал розрахунковим шляхом визначено тиск газового струменя на внутрішню поверхню каналу, що імітує рядне розташування сопел в системі вторинного охолодження.

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

**РОЗДІЛ 1**  
**ПЕРЕДУМОВИ ВИКОРИСТАННЯ ТРАНСЗВУКОВОЇ ГАЗОВОЇ**  
**СТРУМИНИ ДЛЯ ОХОЛОДЖЕННЯ ПРОКАТУ**

1.1 Характеристика процесу безперервного лиття заготовок

Зона вторинного охолодження значно впливає на якість заготовки перед прокаткою. Це, в першу чергу, відноситься до запобігання формування різного роду термічних внутрішніх напружень в твердому каркасі заготовки. Параметри вторинного охолодження впливають на геометричну форму заготовки і якість макроструктури.

Система вторинного охолодження МБЛЗ складається з опорних елементів, що підтримують заготовку, пристроїв, що забезпечують охолодження злитка, а також спеціальних пристроїв, що впливають на структуру заготовки що кристалізуються (електромагнітний вплив, м'яке обтиснення, та інші).

Опорні елементи направляють рух заготовки і запобігають деформації граней злитка під дією феростатичного тиску. Безпосередньо під кристалізатором, де оболонка заготовки має невелику товщину і міцність, її деформація може призводити до проривів металу, а в нижніх зонах вторинного охолодження – до утворення тріщин і лікваційних смужок поблизу фронту затвердіння. Особливі вимоги пред'являються до підтримуючих пристроїв, розташованих безпосередньо під кристалізатором, де оболонка заготовки має ще малу товщину і високу температуру. Найбільшого поширення в даний час отримали роликові секції.

На ділянці загину і випрямлення безперервнолитого металу на криволінійних МБЛЗ, крім виконання функції підтримки заготовки, на ролики додається функція правки заготовки. Відомі різні схеми ділянок випрямлення слябів: зі стаціонарною установкою роликів, з плаваючою касетою підтримуючих роликів, з підпружиненими підтримуючими роликами, з

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

балансирною установкою верхніх роликів, з балансирною установкою чотирьохроликів блоків та інші.

Зниження температури в зоні вторинного охолодження досягається шляхом обприскування заготовки водою або водоповітряної сумішшю, відведення тепла до підтримуючих роликів, а також внаслідок конвекції і випромінювання в навколишнє середовище.

Інтенсивність охолодження у вторинній зоні повинна вибиратися таким чином, щоб температура поверхні заготовки в процесі її переміщення залишалася постійною або повільно зменшувалася. Досить часто перевага віддається варіанту, при якому температура поверхні повільно знижується по всій довжині ЗВО.

Температура поверхні безперервної заготовки встановлюється таким чином, що тепловий потік через кірку злитка і тепловідвід на поверхні злитка виходять приблизно однаковими. Підвищення інтенсивності тепловідведення обмежується кінцевим термічним опором кірки заготовки. Інтенсивним охолодженням можна знизити температуру поверхні безперервного злитка, однак, на температурний режим в кірці заготовки і на сумарний тепловідвід воно надає лише несуттєвий вплив. Прийнято вважати, що оптимальною температурою поверхні заготовки в ЗВО є діапазон 1000...1100 °С. При цьому вибір раціонального рівня температур заготовки в ЗВО залежить від ряду факторів, що включають марку сталі, метод охолодження, тип МБЛЗ та інші.

Безперервний розлив сталі на УБРС являється невід'ємною складовою частиною сучасного сталеплавильного виробництва. Зростання вимог до якості отриманого металу сприяє удосконаленню технічного і технологічного оформлення процесу безперервного розливу, який в значній мірі визначає ефективність всієї сталеплавильної переробки в цілому.

Основними тенденціями в сучасному безперервному розливі сталі являються зростання економічності процесу, зниження енергетичних затрат,

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

орієнтація на виробництво напівпродукта, близького по перерізу до готового прокату і який вимагає мінімальної обробки в прокатній переробці. Для застосування технологій гарячого посаду та прямої прокатки безперервнолитих заготовок, які реалізують ці тенденції, вимагається їх висока температура на виході з УБРС та хороша якість поверхні.

Для забезпечення цих вимог використовується цілий ряд заходів, які підвищують якість отриманого зливку ( оптимальний режим коливання кристалізатора, підбір шлакоутворюючих сумішей, електромагнітне перемішування та інші), а також повна автоматизація процесу виливки. Одним з ефективних заходів, підвищуючих якість поверхні безперервнолитих зливків, являється удосконалення охолодження у вторинній зоні. Розвиток систем вторинного охолодження проходить в напрямку підвищення їх надійності, найбільш рівномірного охолодження поверхні зливку завдяки формуванню потоків охолоджувача із задовільною структурою факела зрошення та можливістю регулювання в широких межах інтенсивності охолодження. Для забезпечення рівномірно м'якого охолодження безперервнолитих зливків на сучасних УБРС широко застосовується двохкомпонентне водоповітряне охолодження, яке дозволяє в значній мірі усунути недоліки, притаманні однокомпонентному водяному охолодженню та значно підвищити якість поверхні та внутрішньої структури безперервнолитого металу.

## 1.2 Особливості водоповітряного охолодження

Охолодження безперервнолитого зливка в зоні вторинного охолодження являється однією з основних технологічних операцій, яка визначає якість його поверхні. В наш час на УБРС використовуються два різновиди форсунового охолодження – однокомпонентне водяне (спресне) та двохкомпонентне водоповітряне. У відповідності з цим використовуються форсунки різних типів. Так, для однокомпонентного водяного охолодження застосовують багатофорсунокові системи, які включають в себе форсунки для

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

формування факелів плоскої, конусоподібної або овальної форми, а також однофорсункові пристрої для формування плоскої струмини з широким кутом розпилення. Для двокомпонентного водоповітряного охолодження використовують форсунки, які формують плоскі та конусоподібні водоповітряні факели.

Зовнішній вигляд форсунок для спреєрного однокомпонентного охолодження на слябових УБРС, які використовуються фірмою «Mannesmann Demag» («Маннесман Демаг»), ФРН.

З характеристики форсунки для однокомпонентного водяного охолодження, бачимо, що шляхом зміни тиску води в системі швидкість подачі води на охолодження зливка можна змінювати в діапазоні від 5 до 20 л/хв. На цьому ж малюнку приведені схеми соплової частини форсунок для водяного охолодження із збільшеним кутом розпилення факелів.

Витрата води на струминне охолодження в зоні вторинного охолодження в минулому, частково для слябових УБРС, складав близько 2,0 л/кг та був значно знижений лише тоді, коли встановили, що неконтрольовано стікаюча вода призводить до виникнення поперечних тріщин на поверхні зливка, особливо на його кутах. При цьому спостерігалось сильне термоциклювання поверхні безперервнолитого зливка, перепади температур окремих ділянок складав 150...200 С. Це сприяло розробці форсункових систем, які забезпечують найбільш м'який режим охолодження.

З цієї точки зору дуже ефективним та порівняно економним способом підвищення якості метала являється використання при безперервній розливці сталі водоповітряного охолодження. Технологія водоповітряного охолодження широко використовується в Японії, Німеччині, Франції, США та інших країнах на більшості УБРС всіх типів. В СРСР розробкою устаткування та технологічних режимів водоповітряного охолодження на УБРС займаються Інститут чорної металургії (ІЧМ), ЦНП чорної металургії, Всесоюзний науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут металургійного

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

машинобудування, ПО «Уралмаш» та «Южуралмаш» та інші організації. Подібні системи охолодження експлуатуються на металургійних комбінатах «Азовсталь», Орсько-Халіловському, Новолипецькому та Оскольському електрометалургійному комбінаті та на ряду інших металургійних і машинобудівних заводах.

- Широке використання та розробка нових систем водоповітряного охолодження пов'язане з рядом їх важливих переваг в порівнянні з водяним охолодженням:

- широкий діапазон регулювання інтенсивності охолодження (1...6,5) – (1...8) в порівнянні з 1...2,5 у водяного, визначуваний можливістю зміни в широких межах співвідношення витрати води та повітря в суміші. Це дозволяє застосовувати подібну систему охолодження при розливці широкого асортименту сталі з різноманітними швидкостями. Зокрема, стає можливою розливка тріщино-чутливих сталей, що містять елементи типу ніобія, бора, алюмінія та інші;

- забезпечується більш рівномірне охолодження поверхні безперервнолитого зливка при більш високій площі зрошування в кожному мікроликовому просторі, що значно знижує величину термоциклювання поверхні та запобігає розвитку поверхневих дефектів. Зокрема, відсутні переохолодження внаслідок стікання або накопичення води на поверхні зливка;

- знижується витрата води на вторинне охолодження більш ніж в 2 рази та зменшуються енергозатрати на її очищення;

- забезпечується стабілізація параметрів охолодження безперервнолитого зливка в процесі серійної розливки із-за меншого засмічення форсунок. Крім того, при водоповітряному охолодженні забезпечується найбільш стійка робота форсунок при малих локальних густинах зрошення (0,5...1,5 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·год), при яких аналогічні форсунки при розпиленні однієї води працювати не можуть.

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 1.3 Принцип роботи ЗВО

Зона вторинного охолодження розташовується на відрізку технологічної лінії від кристалізатора до валків, що тягнуть. У окремих випадках допускається продовження ЗВО за валками, що тягнуть. За зоною вторинного охолодження розташовується зона охолодження зливка на повітрі.

Призначення ЗВО – подальше твердіння неперервно литого зливка після виходу його з кристалізатора. В межах цієї зони необхідно виконати дві основні задачі: забезпечити відвід теплоти з внутрішньої рідкої зони зливка; зберегти форму зливка.

У відповідності з цим в ЗВО передбачена система охолодження зливка (наприклад, форсунокова), а також підтримуюча система (роликова та інша). Із усієї кількості теплоти, що відводиться від неперервно литого зливка в межах МБЛЗ, на частку зони вторинного охолодження припадає до 50 %. Охолодження зливка в ЗВО може здійснюватися водою або іншими теплоносіями. Найбільше розповсюдження отримало водяне охолодження, так як у порівнянні з іншими речовинами вода володіє рядом переваг: дешевизною, доступністю, нейтральністю, хорошими теплотехнічними властивостями, а саме, високим значенням теплоємності. Крім того, при перекачуванні води значно менші енергетичні затрати у порівнянні з газоподібними речовинами. Недоліком водяного охолодження являється трудність регулювання на малих витратах. Окрім води знаходять застосування водяна пара, повітря та різноманітні суміші.

По принципу дії та улаштуванню розрізняють дві принципово різні конструкції ЗВО: відкритого та закритого типів.

В першому з них відбувається подача охолоджуючої води або іншого теплоносія безпосередньо на поверхню зливка за допомогою спеціальних розбризкуючих приладів (наприклад, форсунок).

У другому випадку охолодження здійснюється в закритих водоохолоджуючих екранах або шляхом безпосередньої взаємодії зливка з

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

поверхнею водоохолоджуючого елементу.

До нашого часу найбільш широке розповсюдження отримали ЗВО відкритого типу з ролико-форсунковим охолодженням неперервно литої заготовки.

Великі промислові установки такого типу працюють на Новолипецькому металургійному комбінаті, заводі “Азовсталь”, Череповецькому металургійному комбінаті та на ряді інших.

У міру розвитку способу неперервної розливки сталі застосовувалися різноманітні методи водяного охолодження: струминне, форсункове, ролико-форсункове, форсунково-брусове, роликове (безфорсункове), панельне. Ці способи відрізняються інтенсивністю та витратами води.

Для порівняльного аналізу зручно застосовувати величину щільності зрошення  $g_F$ , яка характеризує собою об'ємну витрату охолоджуючої води, яка припадає на одиницю поверхні зливка:  $g_F = G_B/F$ .

При різноманітних способах охолодження величина щільності зрошення може змінюватися в межах (4...10 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>-год) та більше. В багатьох практичних випадках для аналізу інтенсивності охолодження застосовуються питомі витрати води, віднесенні до одиниці маси металу, що охолоджується. У загальному випадку питомі витрати змінюються в межах  $g=0,5...5,0$  л/кг та більше.

Струминне охолодження забезпечує найбільшу інтенсивність, однак при цьому відбувається різке переохолодження поверхні зливка, виходить великий перепад температур по товщі скоринки, що може призвести до утворення значних термічних напруг.

Форсункове охолодження дозволяє знизити інтенсивність охолодження, питомі витрати води при цьому становлять 1...2 л/кг.

Роликофорсункове охолодження передбачає подачу води, що розпилюється форсунками, на поверхню зливка між опорними роликками підтримуючої системи. Цей спосіб дозволяє забезпечити “пом'якшений”

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

режим охолодження з питомими витратами води 0,5...1,0 л/кг.

При роликовому способі (безфорсунковому) охолоджуюча вода з відводів у колекторі подається під малим тиском безпосередньо на ролики, що забезпечує безударне охолодження їх поверхні. Охолодження зливка відбувається за рахунок контактного теплообміну між холодними роликами та поверхнею зливка, а також частково за рахунок стікаючої охолоджуючої води.

Екранний спосіб охолодження представляє систему закритого типу. Для охолодження зливка у ЗВО встановлюються водоохолоджуючі екрани, що оточують усі грані зливка. Окремі секції екранів виконані подібно кристалізатору із товстостінної мідної облицьовки, що стягнута сталевим корпусом. Екрани забезпечують м'яке та більш рівномірне охолодження поверхні неперервно литого зливка, але при їх використанні значно знижується інтенсивність тепловідводу, що призводить до заглиблення рідкої фази на 10...15 %, і внаслідок, до подовження ЗВО.

Конструктивно, зона вторинного охолодження виконується із окремих секцій, у яких можна змінювати режим охолодження. На основі великого практичного досвіду рекомендується усю зону вторинного охолодження розділяти на три ділянки з різними співвідношеннями по витраті охолоджуючої води, % від загальної витрати у ЗВО: ділянка I – (50...60) від загальної витрати води у ЗВО; ділянка II - (25...30); ділянка III –(15...20).

Для злиwkів прямокутного перерізу відношення витрати води на широкі грані до витрати на вузькі грані не перевищує 4,5...5. Часто охолодження вузьких граней передбачається тільки на першій верхній ділянці, а далі забезпечується охолодження водою тільки широких граней. У криволінійних установках на широкі грані меншого радіуса  $r$  витрата води встановлюється приблизно на 20 % менше, ніж на широкі грані великого радіуса  $R$ .

Однією з основних вимог до системи ЗВО полягає в тому, щоб її довжина забезпечувала повне твердіння зливка до входу його у кліть, що тянеться. Інакше кажучи, при обтисканні зливка з незатверділою

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

серцевиною у його перерізі можуть виникнути внутрішні тріщини. Таким чином, протяжність ЗВО являється одним із важливіших конструктивних параметрів. Сумарна довжина кристалізатора та зони вторинного охолодження повинна бути не менше, ніж глибина рідкої фази в зливку.

Від режимів роботи ЗВО у значній степені залежить якість отримуваних неперервно литих злиwkів (наявність внутрішньої вісьової рихлості, тріщин та інші).

Конструкція ЗВО та режим роботи визначаються маркою сталі, профілем та розмірами зливка, швидкістю розливки.

В залежності від марок сталей та їх фізичних властивостей визначається спосіб охолодження. На основі практичного досвіду для різноманітних сталей встановлюються норми вторинного охолодження – питомі витрати води та розподіл по висоті зони. Сталі, які володіють значною міцністю при температурах, близьких до температури твердіння, та що не зазнають фазових перетворень при охолодженні, можна охолоджувати інтенсивно. Наприклад, найбільш інтенсивний струминний спосіб охолодження можна застосовувати для сталей аустенітного класу. Інші ж сталі, навпаки, не можна охолоджувати з високою інтенсивністю, так як при цьому можлива поява внутрішніх тріщин.

Для деяких вуглецевих сталей рекомендуються режими охолодження з  $g=1,1\dots 1,25$  л/кг. Наголошується, що при відливці слябів з такими витратами виключається утворення вісевих тріщин на торцях слябів. По зарубіжним даним подібні режими рекомендуються при відливці крупних слябів перерізом 2030·305 мм.

Для вуглецевих та низьколегованих сталей найбільш раціональним являється зм'якшений режим охолодження з  $g = 0,65\dots 0,8$  л/кг.

М'які режими охолодження, які забезпечуються при екранному способі, застосовуються для високовуглецевих, легованих та інших спеціальних марок сталей, для яких вже при  $g=0,5$  л/кг може з'явитися

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

небезпека утворення внутрішніх тріщин.

Для неперервної розливки високоякісних сталей дуже важливо, щоб система вторинного охолодження передбачала можливість регулювання інтенсивності охолодження, починаючи з моменту початку розливу.

Під раціональним режимом охолодження звичайно розуміють таке розподілення інтенсивності тепловідводу уздовж технологічної вісі МБЛЗ, при якому якість отриманого неперервно литого зливка задовольняє відповідним вимогам по основним показникам для заданої продуктивності машини.

Для зливків різного перерізу заданої марки сталі потрібний свій раціональний режим охолодження, тому інтенсивність вторинного охолодження та витрата води повинні бути пристосовані до розмірів та профілів вилитих заготовок.

У квадратних перерізах кількість тепла, що відводиться, швидко зменшується по мірі збільшення глибини рідкої зони, оскільки периметр цієї зони значно зменшується зі зміною глибини.

Навпаки, в прямокутних перерізах зазначена зона набуває форму клина, ширина якого дуже повільно зменшується зі збільшенням глибини. З цієї причини поверхня рідкої зони також скорочується повільно аж до повного затвердіння. Отже, для квадратних перерізів зливків інтенсивність вторинного охолодження повинна поступово зменшуватись по мірі наближення до межі рідкої зони, а для прямокутних перерізів, у яких відношення між шириною та товщиною більше, інтенсивність охолодження повинна, навпаки, залишатися практично постійною аж до повного затвердіння зливка. При зміні перерізів прагнуть, щоб конструкція ЗВО забезпечувала можливість швидкої перебудови.

Великий вплив на хід затвердіння зливка надає конструктивне оформлення ЗВО та спосіб охолодження безпосередньо під кристалізатором. При струминному або форсунковому охолодженні з великими питомими

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

витратами води частина її проникає знизу в зазор між стінками кристалізатора та зливком, який утворився в результаті усадки, що призводить до різкого збільшення інтенсивності тепловідводу у нижній частині кристалізатора за рахунок зниження термічного опору зазору. При ролико-форсунковому охолодженні з меншими витратами вода не проникає в зазор, а отже, інтенсивність охолодження в цьому випадку нижча, що впливає на товщину скоринки. Наприклад, для однакової швидкості розливки 0,77 м/хв при зниженні питомих втрат води з 5 до 9 л/кг товщина скоринки на виході з кристалізатора зменшується по широкій грані з 43 до 30 мм а по вузькій – з 34 до 30 мм. Тому на практиці у випадку ролико-форсункового охолодження з невеликими витратами води для запобігання можливості прориву передбачають установку форсунок, які направлені знизу вгору (так званий режим охолодження “з підбоек” знизу).

У міру розвитку МБЛЗ для різноманітних установок застосовувались наступні основні види підтримуючої системи: брусова (або рейкова), роликова, крокуючі балки, екранна та інші.

Брусова підтримуюча система була розроблена у перший же період освоєння неперервної розливки. Вона порівняно проста у виготовленні та експлуатації, забезпечує хорошу міцність. Бруси розташовуються уздовж руху зливка в декілька рядів по його ширині. У проміжках між брусами встановлюються форсунки. Охолодження брусів виконується за рахунок води для охолодження зливка. До нашого часу брусова система знаходить широке застосування у машинах вертикального типу. Однак при русі зливка виникають значні сили тертя об бруси, що істотно ускладнює процес витягування та завдає додаткові напруги в скоринці зливка. Тому загальна протяжність брусів секцій має обмежену довжину.

На наступному етапі розвитку МБЛЗ широкого застосування отримала роликова підтримуюча система. Ролики виготовляють із спеціальних сталей з внутрішнім або зовнішнім водяним охолодженням. Вони розташовуються

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

упоперек зливку з визначеним кроком і обертаються уздовж його руху, що забезпечує неперервність та плавність процесу витягування зливка, значно знижує сили тертя об поверхню зливка. Разом з тим, при відливці слябів великої ширини (до 2 м та більше) ролики великої довжини не забезпечують достатньої міцності, що може призвести до спотворення профіля зливка.

При збільшенні діаметра підтримуючих роликів значно зменшується зона зрошення між ними, що може привести до місцевого розігріву поверхні зливка. Для збереження необхідної міцності часто застосовують подвійну систему роликів основних та підпірних, що ускладнює конструкцію підтримуючої системи та ускладнює її експлуатацію. Роликова підтримуюча система отримала розповсюдження в машинах криволінійного типу.

В потужних машинах вертикального типу знаходить застосування комбінована система, яка складається з брусів та роликів секцій. Брусові секції встановлюються у верхній частині машини, відразу за кристалізатором, де товщина затверділої скоринки зливка ще незначна та, отже, особливо необхідна достатня міцність підтримуючої системи для запобігання зливка від витріщення. Далі в нижній частині ЗВО розташовуються роликові секції.

У деяких МБЛЗ конструкції УЗТМ застосовувались крокуючі балки з водяним охолодженням. Однак вони не отримали широкого розповсюдження, мабуть, через складність механічної системи балок.

Водоохолоджуючі екрани, які оточують зливки з усіх сторін, виконують подвійну функцію – як система охолодження та підтримуюча система.

Для вторинного охолодження неперервно литого зливка частіше за все застосовуються системи форсунок. В залежності від конструкції МБЛЗ, розмірів зливків та інших факторів використовуються форсунки різноманітних типів, які розташовуються на стояках або поперечних трубопроводах.

Форсунки для вторинного охолодження виконують головне завдання – створюють необхідну щільність зрошення поверхні, а також забезпечують

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відповідну швидкість крапель води, рівномірність охолодження поверхні зливка, можливість регулювання витрати води в широких межах.

Перший досвід освоєння МБЛЗ показав, що звичайні промислові форсунки для мілкового розпилу води з малим діаметром вихідного перерізу дуже швидко засмічуються, форсунки з великим діаметром вихідного перерізу не дають необхідного розпилу факела. У зв'язку з цим були розроблені спеціальні форсунки з механічним розпилом.

Спочатку широко використовувались круглофакельні форсунки з кутом розкриття факела приблизно  $60^\circ$ . Відцентрові форсунки з конічним факелом та черв'ячним розпилювачем не забезпечували необхідної рівномірності зрошення поверхні зливка.

Останнім часом широкого застосування знаходять ширококутові плоскофакельні форсунки (наприклад, отворового типу) з кутами розкриття факела  $90^\circ$  та  $120^\circ$ , які забезпечують найкраще розподілення води по ширині крупних слябів. Особливо зручні подібні форсунки при установці на потужних МБЛЗ у вузькому мікроликовому просторі.

У зв'язку з труднощами регулювання режимів водяного охолодження при низькій інтенсивності ведуться дослідження по застосуванню інших способів охолодження, аналізуються можливості використання різних теплоносіїв. Зниження інтенсивності вторинного охолодження дозволяє вирівнювати графік зміни температури поверхні по довжині зливка, а також збільшити значення температури поверхні в кінці ЗВО.

Проводилися численні дослідження по визначенню коефіцієнтів тепловіддачі для різноманітних видів охолоджувачів. Інтенсивність охолодження зменшується в наступній послідовності: вода, водоповітряна суміш, повітря при витіканні через патрубок без форсунки, водяна пара, повітря.

Як показано у роботі А.А.Скворцова та А.Д.Акименко, охолодження неперервно литого зливка насиченим паром в принципі не відрізняється від

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

водяного, інтенсивність при цьому значно не змінюється. А застосування перегрітого пару енергетично не вигідно у зв'язку з його великими витратами.

Застосування вентиляторного повітря не дає значного збільшення інтенсивності у порівнянні з вільним охолодженням, але потребує додаткової установки вентиляторів. Застосування компресорного повітря потребує установки компресорних агрегатів великої потужності, тому енергетично невиправдані. Були спроби застосування пароводяної суміші, однак, цей спосіб не знайшов широкого застосування.

Можливість більш тонкого регулювання витрати води, а також зниження інтенсивності вторинного охолодження досягається при використанні комбінованого водоповітряного охолодження. Вперше цей метод був застосований у 1958 році на заводі "Червоне Сормово".

У наш час спосіб водоповітряного охолодження знаходить широке промислове застосування у нашій країні та за кордоном. Він володіє рядом переваг перед водяним охолодженням: високою ефективністю та рівномірністю охолодження, великою гнучкістю в експлуатації та регулюванні, істотним зниженням витрати води, стійкістю до засмічення форсунки та, отже, меншими вимогами до очистки води, збільшенням надійності роботи.

Для водоповітряного охолодження також розроблялись спеціальні конструкції форсунок з підводом повітря у тому ж напрямку, що й вода, або під кутом  $60...90^\circ$  до напрямлення подачі води. Наприклад, в одній із закордонних робіт описується схема форсунки системи "Лехлер" з напрямком потоку повітря перпендикулярно напрямку води; вихідний переріз форсунки  $20 \text{ мм}^2$  у порівнянні з  $3...4 \text{ мм}^2$  у звичайних форсунках. Однак така форсунка забезпечує мілке розпилення з розміром краплі  $59 \text{ мкм}$  у порівнянні з  $116 \text{ мкм}$  при розпилу води, широкий діапазон регулювання витрати води (1:40); завдяки порівняно великому вихідному перерізі вона не засмічується та не потребує особливої очистки води.

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

По даним різних авторів співвідношення вода – повітря повинно складати  $(1/2,5) \dots (1/10)$  та може доходити до  $1/20$ . Витрати води складають  $0,2 \dots 12$ , а витрати повітря  $150 \dots 400$  л/хв. Такі форсунки встановлюються збоку від заготовки біля вузьких граней сляба та подають струмини водоповітряної суміші уздовж поверхні широких граней в зазори між заготовкою та підтримуючими роликками паралельно вісям роликків. Туманоподібна водоповітряна суміш заповнює весь простір в цьому зазорі, видуваючи надлишок не випаруваної води, що накопичується в місці контакту роликків із заготовкою, що забезпечує більш рівномірне та інтенсивне охолодження.

В той же час у деяких дослідженнях відмічається, що у зв'язку відхилення у розподіленні повітря, що подається, розмір крапель по ширині слябу не завжди однаковий, а розповсюдження водяного туману по ширині слябу часто нерівномірно. Однак в усіх випадках водоповітряне охолодження показало перевагу над форсунковим водяним охолодженням.

#### 1.4 Теплообмін у ЗВО

Теплові режими вторинного охолодження мають суттєвий вплив на продуктивність МБЛЗ та якісь відливаних неперервно литих заготовок.

При переході на підвищені швидкості відливу дуже важливо вивчити особливості процесів затвердіння та охолодження, так як з підвищенням швидкості значно зменшується товщина твердої скоринки зливка, знижується її механічна міцність, збільшується ймовірність прориву.

Для подальшого підвищення якості неперервно литих зливок необхідно проаналізувати умови охолодження, принципи та методи його організації, встановити основні закономірності теплопередачі у ЗВО та можливості керування тепловими режимами охолодження неперервно литих зливок.

В межах ЗВО необхідно здійснити відвід теплоти для закінчення

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

процесу твердіння; забезпечити необхідну інтенсивність охолодження зливка, при якій досягається рівномірне і безперервне зниження температури поверхні, що сприяє підвищенню якості відливки. При неправильній організації теплового режиму охолодження може відбуватися стрибкоподібна зміна температури поверхні зливка по його висоті та периметру, що призводить до зростання термічних напружень та можливості виникнення тріщин.

Теплотехнічні параметри вторинного охолодження та, зокрема, розподілення інтенсивності охолодження по довжині та периметру зливка надає вирішальний вплив на якість відливок, їх внутрішню будову (тріщини, вісьова рихлість та інші).

По даним А.А.Скворцова та А.Д.Акименко в зоні вторинного охолодження діючих установок основна кількість теплоти відводиться від зливка охолоджуючою водою та паром, що отримуються при частковому випаруванні води в умовах зіткнення її з нагрітою поверхнею зливка.

Щільність теплового потоку може бути визначена з рівняння:

$$q = \alpha(T_{\text{п}} - T_{\text{в}}) \quad (1.1)$$

де  $\alpha$  - коефіцієнт тепловіддачі конвекцією від поверхні зливка до охолоджуючої води, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$T_{\text{п}}$  - температура поверхні зливка, К;

$T_{\text{в}}$  - температура охолоджуючої води, К.

Важливим параметром, що визначає режим вторинного охолодження, являється коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$  на поверхні зливка, вивченню якого присвячені роботи багатьох дослідників.

Для водяного вторинного охолодження основне значення має конвекційний теплообмін при обтіканні поверхні зливка водою,

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

закономірності якого описуються критеріальною залежністю типу  $Nu = f(Re)$ . Згідно цьому визначаючими являються умови вимушеного руху плівки рідини уздовж охолоджуючої поверхні неперервно литого зливка.

У випадку поздовжнього обтікання площини  $\alpha$  може бути визначений по критеріальній формулі:

$$Nu = cRe^n, \quad (1.2)$$

де  $Nu = \alpha \cdot l / \lambda_B$  – критерій Нуссельта;

$Re = \omega_B \cdot l / \nu_B$  – критерій Рейнольдса;

$l$  – характерний розмір;

$\lambda_B, \nu_B$  – коефіцієнти теплопровідності та кінематичної в'язкості для охолоджуючої води;

$c, n$  – дослідні коефіцієнти.

Однак розрахунки  $\alpha$  для випадку турбулентного режиму течії в пограничному шарі дають завищені результати у порівнянні з величинами, які отримані в дослідах. Це пояснюється тим, що при обтіканні поверхні зливка з високою температурою (900...1100°C) відбувається часткове випарування води та утворення парової плівки, яка значно знижує інтенсивність тепловіддачі.

Теоретична оцінка коефіцієнтів тепловіддачі у ЗВО ускладнюється і такими факторами, як неоднорідність поля швидкостей води у факелі форсунок, плівкою стікаючої води та інші. Тому у багатьох випадках величини  $\alpha$  визначають на основі експериментальних досліджень.

Передача теплоти від неперервно литого зливка до води у ЗВО відбувається у дуже складних умовах та залежить від режимних факторів, що визначають гідродинамічну картину на охолоджуючій поверхні, та конструктивні параметри зони.

На ряду зі зрошенням поверхні зливка подрібненими краплями води з

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

форсунки, у зоні нижнього ролика утворюється шар води, що стікає далі по поверхні. Між роликами виділяють декілька зон, які відрізняються по механізму тепловідводу: зона зрошення водою, натікання струмини, ділянка контактного охолодження роликом і зона вільної конвекції та випромінювання на повітрі. Найбільший тепловідвід здійснюється у зоні безпосереднього зрошення водою поверхні зливка. Процес форсункового водяного охолодження розділяється на наступні стадії: становлення процесу; стадія плівкового кипіння, що характеризується наявністю стійкої парової оболонки та значним зниженням коефіцієнта тепловіддачі; руйнування плівки (короткочасне пухляке кипіння); стадія конвективної тепловіддачі без кипіння.

Є.Мизикаром виявлені три механізми відбору теплоти в залежності від температури охолоджуючої поверхні:

– при температурі нижче критичної (у досліді 565°C та вище 120°C) водяні краплі проникають через парову плівку, що утворюється в результаті співіснування плівкового та пухлякого режимів кипіння;

- при температурі поверхні, близької до температури кипіння, пароутворення завершується та реалізується конвективна тепловіддача;

- при температурі поверхні вище критичної утворюється стійка парова плівка, яка ізолює краплі води від поверхні.

Внаслідок значного перепаду температур на межі зливка-середовище виникає плівковий режим кипіння води. В цій зоні теплообмін зливка визначається термічним опором оболонки металу та парової плівки. В якості ефективних засобів руйнування парової плівки іноді пропонується переривисте охолодження, яке розділене невеликими зонами конвекційного теплообміну на повітрі, зміною кута атаки струмини по відношенню до поверхні, що охолоджується. Однак наявність зон конвекційного теплообміну на повітрі може призвести до розігріву скоринки зливка, тому являється не бажаним.

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Деякими закордонними дослідниками встановлено, що в загальному випадку теплообмін у зоні зрошення відбувається шляхом конвекційної тепловіддачі до охолоджуючої води, випромінюванням між поверхнею зливка та оточуючими деталями агрегату, тепловіддачею на випарування та кипіння води, а також контактним теплообміном з опорними роликками. Як показали результати досліджень умови охолодження у ЗВО, які проведенні при відливці широких слябів товщиною 0,12 м, найбільша частка теплоти видаляється потоками води (39 %), випромінюванням передається (28 %), теплопровідністю в роликки (17 %), передається струменями у момент зіткнення зі зливком (16 %) теплоти, роль конвекційного теплообміну з оточуючим повітрям незначна.

Потік випромінювання з поверхні зливка, нагрітого до (900...1100°C), майже повністю екранується паровою плівкою та шаром води, що покривають поверхню зливка при форсунковому водяному охолодженні.

На діючих установках у ЗВО основна кількість теплоти відводиться від зливка охолоджуючими водою та паром, що отримуються при частковому випаруванні води в умовах зіткнення її з розігрітою поверхнею зливка. Випарування частини води призводить до інтенсивної тепловіддачі від поверхні зливка внаслідок великої теплоти пароутворення. Дослідним шляхом встановлено, що відносна кількість води, що випаровується складає 8...10 % при зміні густини зрошення в межах 2...7 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·год).

Коефіцієнт тепловіддачі, віднесений до середньої температури охолоджуючої води без розділення нагріву та випарування охолоджуючої води :

$$\alpha = \frac{(Q_B + Q_{\text{ПАР}})}{F(t_{\text{П}} - t_B)}, \quad (1.3)$$

де  $Q_B$  - кількість теплоти в одиницю часу, що йде на нагрівання

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

охлаждающей воды, Вт;

$Q_{\text{ПАР}}$  - кількість теплоти в одиницю часу на випарування охлаждающей води, Вт;

$F$  - поверхня вторинного охолодження,  $\text{м}^2$ ;

$t_{\text{П}}$  - середня температура поверхні зливка у зоні вторинного охолодження,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_{\text{В}}$  - середня температура охлаждающей води,  $^{\circ}\text{C}$ .

По дослідним даним при ролико-форсунковому та форсунково-брусовому охолодженні  $\alpha$  змінюється в межах  $140 \dots 540 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  при зміні щільності зрошення в межах  $1,5 \dots 4,5 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ . Такі значення  $\alpha$  відповідають щільності теплового потоку при частковому випаруванні охлаждающей води  $5 \dots 15\%$ .

В умовах форсункового охолодження тривалість зони плівкового кипіння в значній мірі залежить від щільності зрошення на одиницю охлаждающей поверхні  $g_{\text{F}}$ . Основною залежністю, що визначає процес тепловіддачі при водяному форсунковому охолодженні нагрітих поверхонь, являється залежність коефіцієнта тепловіддачі від щільності зрошення:

$$\alpha = f\left(\frac{G_{\text{В}}}{F}\right) \quad (1.4)$$

Значення дійсних  $\alpha$  використовуються для аналізу фізичної сутності процесу охолодження. Середні величини коефіцієнта тепловіддачі являються початковою величиною, що використовується при дослідженні теплової роботи зони вторинного охолодження у цілому в інтервалі температур поверхні від  $900$  до  $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Практичною задачею створення оптимальних умов охолодження зливка в зоні вторинного охолодження являється встановлення кількісних співвідношень між коефіцієнтами тепловіддачі та щільністю зрошення.

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У зв'язку зі складністю процесу та неможливістю точної оцінки впливу всіх факторів при теоретичних розрахунках, часто у конкретних умовах експериментально оцінюють залежність коефіцієнту тепловіддачі від щільності зрошення.

Встановлено, що ця залежність має майже лінійний характер та може апроксимуватися простим вираженням:

$$\alpha_{\text{сп}} = k_{\text{в}} \cdot g_{\text{F}} \quad (1.5)$$

де  $g_{\text{F}}$  – щільність зрошення,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ ;

$k_{\text{в}}$  – коефіцієнт пропорційності, який визначається з досліду;

По даним різноманітних авторів для різних випадків  $k_{\text{в}} = 50 \dots 120$   $(\text{Вт} \cdot \text{год})/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ .

Лінійна залежність може використовуватись у робочих діапазонах зміни щільності зрошення приблизно до  $20 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ . При підвищенні величини щільності зрошення більше  $20 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ , значення  $\alpha$  практично стабілізується.

Тепловіддача у ЗВО на криволінійних установках протікає в більш складних умовах, ніж на вертикальних. Додаткова складність постає в тому, що криволінійна грань меншого радіуса  $r$  охолоджується водою, що поступає в основному зверху, а грань більшого радіусу  $R$  охолоджується водою, що поступає знизу. Це створює різні умови вимушеного руху плівки води уздовж охолоджуючих поверхонь протилежних граней та може призвести до різноманітних коефіцієнтів тепловіддачі при однакових значеннях щільності зрошення.

Експериментальні дані показують, що при однаковій щільності зрошення коефіцієнт тепловіддачі на грані  $r$  більше, ніж на поверхні більшого радіусу. Це пояснюється тим, що на грані  $r$  більша відносна кількість води, що перетворюється в пару, а також більший перепад температур води.

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Встановлені дослідні залежності коефіцієнтів тепловіддачі від щільності зрошення для криволінійних зливків:

$$\alpha^r = 60 \cdot g_F^r; \alpha^R = 50 \cdot g_F^R. \quad (1.6)$$

При дотриманні рівності коефіцієнта тепловіддачі на протилежних сторонах криволінійного зливка отримана залежність між щільністю зрошення для меншого  $r$  та більшого  $R$  радіусів:

$$g_F^r = 0,8 \cdot g_F^R. \quad (1.7)$$

Особливості охолодження поверхневого шару зливка вивчені ще не достатньо. Дані, що приводяться в літературі, про взаємозв'язки коефіцієнта тепловіддачі та щільності зрошення поверхні значно різняться, що ускладнює формулювання граничних умов при математичному моделюванні процесу охолодження зливка.

Отримані результати досліджень часто не враховують екрануючої дії конструкції підтримуючої системи зони вторинного охолодження, зокрема, екранування роликми або брусами, які можуть змінити гідродинамічну картину на поверхні зливка, що охолоджується. У зв'язку з цим при використанні експериментальних залежностей  $\alpha$  від щільності зрошення при відладці режимів вторинного охолодження у реальних умовах роботи МБЛЗ необхідно вводити відповідні поправки, які, очевидно, у кожному частковому випадку будуть залежати від конструктивного виконання ЗВО, від типу підтримуючої системи і тощо.

Для водяного охолодження способи, що застосовуються відрізняються інтенсивністю та величиною коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) :

Струминне охолодження..... 2000...4000

Форсункове жорстке.....1000...1500

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ролико-форсункове (пом'якшене).....	300...500
Роликове (м'яке).....	200...300
Екранне.....	100...150

У зоні вторинного охолодження необхідно підтримувати інтенсивність охолодження на такому рівні, щоб при заданій продуктивності вкінці зони завершувалося повне твердіння зливка, а температура поверхні підтримувалась на рівні не нижче 800°C, що сприяє запобіганню тріщин поблизу фронту кристалізації. Інтенсивність охолодження не повинна перевищувати оптимальні значення по якості зливка і в той же час бути достатньою для забезпечення необхідної швидкості розливки.

Дослідами встановлено, що мається межа кількості теплоти, яка може бути відведена від неперервно литого зливка. Зі збільшенням кількості охолоджуючої води збільшується тепловідвід, що призводить до переохолодження поверхні та може зумовити дефекти в структурі зливка. Таким чином, керування відводом теплоти у зоні вторинного охолодження може зробити значний вплив на якість неперервно литих зливків.

Струминне охолодження забезпечує найбільш високу інтенсивність охолодження, при цьому відвід теплоти в одиницю часу у ЗВО більше, ніж в кристалізаторі. Так при швидкості розливки 0,5...0,8 м/хв у ЗВО  $Q = 2 \cdot 10^6$  Вт (480 ккал/с). Питомі витрати води при струминному охолодженні можуть перевищувати 10 л/кг. Однак, як показують багаточисельні результати дослідів, пропорційне збільшення тепловідводу з ростом питомих витрат відбувається приблизно до  $g = 5,0$  л/кг, а далі уповільнюється. Збільшення питомої витрати води більш як 6,5...7 л/кг практично не впливає на величину тепловідводу. При зміні питомої витрати води в межах 2,5...5,0 л/кг величина  $Q = (1...2) \cdot 10^6$  Вт.

При інтенсивності струминного охолодження, коли  $\alpha = 2500$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), у кінці зони  $t_{\text{п}} = 250...300$ °С, що призводить до виникнення значних термічних напружень та внутрішніх тріщин.

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Форсункове жорстке охолодження з питомими витратами води більш ніж 1 л/кг також призводить до різкого охолодження поверхні.

Досліди показують, що для попередження утворення внутрішніх тріщин питомі витрати води повинні бути  $< 1$  л/кг.

Ролико-форсункове охолодження забезпечує більш помірну інтенсивність охолодження при  $g < 1$  л/кг. Тепловідвід значно знижується у порівнянні зі струминним охолодженням  $Q=(0,4...1,2) \cdot 10^6$  Вт (100...300 ккал/с). При  $\alpha = 250...500$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) забезпечується рівень  $t_{\text{п}} = 600...800^{\circ}\text{C}$  у кінці зони. Метал знаходиться у зоні пластичних деформацій, при цьому покращується якість зливка, знижується кількість внутрішніх тріщин, зменшується викривлення профілю заготовки. Щільність зрошення при ролико-форсунковому способі складає 1,25...3,5 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·год).

При роликовому безфорсунковому охолодженні частина води попадає безпосередньо на поверхню, що охолоджується, так що у чистому вигляді роликове охолодження здійснити практично складно. Роликовий спосіб дозволяє здійснити “м’який” режим охолодження зливка. Інтенсивність роликового охолодження в межах щільності зрошення від 3,0 до 10 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·год) змінюється мало. Це утворює сприятливі умови для рівномірного охолодження зливка. Але з іншого боку, при роликовому охолодженні неможливо забезпечити регулювання інтенсивності охолодження в широких межах.

Екранне охолодження по інтенсивності еквівалентно охолодженню на повітрі в умовах вільної конвекції, що призводить до значного розігріву поверхні зливка.

Основні способи охолодження, які застосовуються в наш час, можна розділити на наступні характерні режими: охолодження в пароводяному середовищі; в пазирчастому шарі води; водоповітряне охолодження; пароповітряне охолодження; охолодження на повітрі.

При інтенсивному водяному охолодженні у пароводяному середовищі

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

на поверхні зливка швидкість твердіння дещо збільшується, глибина рідкої фази зменшується. Але при цьому на поверхні зливка виникає нерівномірне розподілення по периметру парових плівок, що призводить до появи різких градієнтів температур та виникнення тріщин.

Режим, який отримав найбільш широке розповсюдження, являється охолодження в пазирчастому шарі води, при якому одночасно з вирівнюванням температур відбувається рівномірне повільне охолодження зливка. Такий режим забезпечує найкращу якість злиwkів різноманітних профілів та марок сталей.

Водоповітряне охолодження, яке знаходить в останній час все більшого розповсюдження, забезпечує зміну в широких межах  $\alpha=250\dots500$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) і вище. Охолоджуюча вода розпилюється струминами повітря на дрібні частинки. Хмара водоповітряної емульсії, що утворюється при цьому, переноситься з більшою швидкістю по поверхні зливка, що збільшує зону охолодження, підвищує його рівномірність та регулярність. Більш 95 % часток води мають розмір  $\leq 100$  мкм, утворюється водяний туман, об'єм якого у порівнянні зі звичайним водяним охолодженням має більшу величину. Тому, незважаючи на меншу концентрацію води, досягається більш інтенсивне охолодження заготовки, а коливання температури поверхні при охолодженні водяним туманом приблизно у 2 рази. Більш рівномірне та інтенсивне охолодження забезпечується переважно в результаті відводу теплоти на випарування більш мілких крапель води. Перепади температур на поверхні заготовки замість 200°C не перевищують 50°C та відповідно знижуються величини термічних напружень, які викликають появу тріщин. Підвищення швидкості повітряного потоку та витрати повітря при незмінній витраті води збільшує тепловідвід з поверхні зливка. Таким чином, водоповітряне охолодження дозволяє завдяки вирівнюванню температур отримати заготовки з меншими дефектами та високою температурою поверхні у кінці ЗВО.

Пароповітряне та повітряне охолодження характеризуються низькою

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

інтенсивністю. Для газоподібних охолоджувачів  $\alpha=150\dots200$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) і нижче, що призводить до розігріву поверхні зливка та, відповідно, до зниження якості відливки.

Вплив інтенсивності тепловіддачі у зоні вторинного охолодження на якість неперервно литого зливка являється важливим практичним питанням. При виборі режиму охолодження необхідно у першу чергу забезпечити умову, щоб твердіння зливка закінчувалося в межах ЗВО. Однак при високій інтенсивності у випадку струминного охолодження через різке зниження температури поверхні утворювались тріщини. Недостатня довжина ЗВО або низька інтенсивність охолодження може також призвести до появи внутрішніх тріщин через тиск валків на поверхню неповністю затверділого зливка, а також внаслідок розігріву скоринки на виході зливка із ЗВО.

У зв'язку з цим в процесі освоєння неперервного розливу відбувається послідовне зниження інтенсивності тепловіддачі у зоні вторинного охолодження.

Значне зменшення питомої витрати води та відповідно інтенсивності охолодження, у свою чергу, збільшує глибину рідкої лунки та необхідну довжину зони вторинного охолодження. Крім того при низькій інтенсивності  $\alpha=150$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) виникає осьова рихлість у зливку. При підвищенні інтенсивності охолодження до значень  $\alpha=250\dots300$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) значно покращується макроструктура зливка, зменшується осьова рихлість та ліквіація, знижується кількість тріщин та інших дефектів.

По результатам багатьох дослідження встановлено, що швидкість твердіння зливків у ЗВО мало залежить від інтенсивності вторинного охолодження, а залежить, в основному, від товщини зливка. Відповідно, основну частку у тепловідводі складає теплота, що відводиться від твердої скоринки неперервно литого зливка. По даним А.А.Скворцова та А.Д.Акименко збільшення  $\alpha$  у 4 рази від 500 до 2000 Вт/(м<sup>2</sup>·К) призводить до скорочення довжини рідкої фази всього лише на 15 %, отже, іноді можна

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

знехтувати впливом  $\alpha$  на твердіння. Режими охолодження необхідно обирати з урахуванням марки сталі, розмірів, профілю зливка та інших факторів.

У літературі зустрічаються протиправні дані по режимам охолодження. Наприклад, одні автори рекомендують посилити інтенсивність охолодження після закінчення кристалізації неперервно литого зливка, а інші – навпаки послабити її у кінці періоду охолодження. Очевидно, це питання потребує подальшого вивчення з урахуванням конкретних умов.

Важливою практичною задачею створення оптимальних умов охолодження зливка у зоні вторинного охолодження являється встановлення кількісних співвідношень між витратами води та коефіцієнтами тепловіддачі. Останнім етапом реалізації обраного оптимального режиму охолодження являється вибір та розстановка форсунок або інших приладів для подачі охолоджувача у ЗВО. Цим кроком добиваються максимального наближення дійсного розподілення щільності зрошення до заданого.

Результати багатьох досліджень показали суттєву залежність коефіцієнта тепловіддачі від гідродинамічної картини на поверхні зливка, яка, у свою чергу, залежить від тиску води перед форсункою, який визначає витратні та геометричні характеристики форсунок (кути розкриття по вертикалі та горизонталі факелу); відстані форсунки до поверхні, що зрошується; кута атаки струминою поверхні, що охолоджується; орієнтації поверхні у просторі; кількості руху окремих крапель при наближенні до поверхні нагріву; температури поверхні, що охолоджується.

На основі дослідів встановлена залежність коефіцієнта тепловіддачі від температури поверхні, що охолоджується, відстані від форсунки до поверхні, що зрошується, кута атаки струмини та інших факторів. Максимальне значення коефіцієнта тепловіддачі спостерігається у центрі факела.

За межами дії факела форсунки у районі стікаючої води через утворення буферної парової або пароповітряної прошарки відбувається зниження коефіцієнта тепловіддачі до значень  $\alpha=175\dots230$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У зоні зрошення зливка форсункою існують декілька основних параметрів, що впливають на швидкість тепловіддачі: інтенсивність потоку води, розмір крапель та швидкість їх руху, кут розбризкування та ефект змочування. Дослідження коефіцієнта тепловіддачі при використанні плоско-факельних форсунок показали, що інтенсивність теплообміну значно залежить від швидкості течії води з форсунки. При збільшенні швидкості течії у 3 рази  $\alpha$  збільшується у 2,5 рази.

Для більш обґрунтованого вибору варіанту вторинного охолодження, визначення інтенсивності охолодження зливка при проектуванні МБЛЗ необхідні заздалегідь спеціальні дослідження гідравлічних та теплотехнічних характеристик форсунок та інших розпилюючих приладів, що використовуються у ЗВО.

У кінці зони вторинного охолодження після повного твердіння зливка припиняється примусове водяне охолодження. Ця область характеризується вільним охолодженням зливка на повітрі. При виході із зони примусового вторинного охолодження неперервно литий зливочок продовжує охолоджуватися за рахунок випромінювання та вільної конвекції.

Як показують досліди, основна кількість теплоти відводиться від зливка за рахунок випромінювання в оточуюче середовище та лише незначна частина теплоти передається за рахунок вільної конвекції, а також теплопровідністю у ролики по механізму контактного теплообміну. Щільність теплового потоку ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) при охолодженні на повітрі:

$$q_{\text{в}} = \epsilon_{\text{м}} \cdot C_0 \cdot \left[ \left( \frac{T_{\text{п}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{в}}}{100} \right)^4 \right] + \alpha_{\text{к}} \cdot (T_{\text{п}} - T_{\text{в}}), \quad (1.8)$$

де  $\epsilon_{\text{м}}$  - степінь чорноти металу;

$T_{\text{п}}, T_{\text{в}}$  - температура поверхні зливка та оточуючого повітря, К;

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$\alpha_k$  - коефіцієнт тепловіддачі конвекцією, Вт/м<sup>2</sup>·К;

Формулу для розрахунку величини щільності теплового потоку можна представити у вигляді:

$$q_B = \alpha_{\Sigma} \cdot (T_{\Pi} - T_B), \quad (1.9)$$

де сумарний коефіцієнт тепловіддачі, який враховує передачу теплоти випромінюванням та конвекцією, визначається як:

$$\alpha_{\Sigma} = \alpha_{\text{л}} + \alpha_k, \quad (1.10)$$

$$\alpha_{\text{л}} = \frac{\epsilon_M \cdot C_0 \cdot \left[ \left( \frac{T_{\Pi}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_B}{100} \right)^4 \right]}{T_{\Pi} - T_B}, \quad (1.11)$$

а  $\alpha_k$  може визначатися з критеріальної залежності для вільної конвекції типу  $Nu = f(Gr; Pr)$ .

Величина сумарного коефіцієнту тепловіддачі у зоні повітряного охолодження може бути визначена експериментально за допомогою формули:

$$\alpha_{\Sigma} = \frac{q_B}{(T_{\Pi} - T_B)}. \quad (1.12)$$

Нижче приведені значення сумарного коефіцієнта тепловіддачі при вільному охолодженні зливка на повітрі в залежності від температури поверхні зливка.

У випадку вимушеної конвекції коефіцієнт тепловіддачі може визначатися по емпіричним залежностям:

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\alpha_K = 6,16 + 4,18\omega_B \text{ при } \omega_B \leq 5 \frac{\text{м}}{\text{с}}; \quad (1.13)$$

$$\alpha_K = 7,52\omega_B^{0,72} \text{ при } \omega_B \geq 5 \frac{\text{м}}{\text{с}}; \quad (1.14)$$

Таблиця 1.1- Значення сумарного коефіцієнта тепловіддачі при вільному охолодженні зливка на повітрі в залежності від температури поверхні зливка.

$t_{\text{п}}, ^\circ\text{C}$	500	700	800	900	1000	1100
$\alpha_{\Sigma}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	38	57	72	97	120	150

де  $\omega_B$  - швидкість вимушеного руху повітря уздовж поверхні зливка.

При екранному охолодженні за допомогою водоохолоджуючих поверхонь основна кількість теплоти передається випромінюванням як і у випадку охолодження на повітрі. Інтенсивність екранного охолодження еквівалентна охолодженню на повітрі в умовах вільної конвекції.

– максимальних значень коефіцієнт тепловіддачі набуває при фронтальному обдуванні поверхні металу, що охолоджується;

– при застосуванні вісесиметричної струмини коефіцієнт тепловіддачі на 20...40 % вищий ніж при застосуванні плоских сопел за умов рівності швидкостей газу на зрізі сопла та його питомої витрати на одиницю поверхні металу, що обдувається.

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## РОЗДІЛ 2

### МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВЗАЄМОДІЇ ПОВІТРЯНОЇ СТРУМИНИ З ПОВЕРХНЕЮ ЗЛИВКА

2.1 Аналіз існуючих розв'язків задачі взаємодії газової струмини з перешкодою

Практичні потреби ряду пристроїв, функціонування яких пов'язане з розповсюдженням ударних хвиль в каналах складного профілю, а також взаємодією ударно-хвильових утворень з криволінійними поверхнями, призвели до необхідності більш детального дослідження цих процесів [14, 15]. Ударно-хвильові картини течії, що виникають при цьому, виявилися надзвичайно складними та вимагають для свого аналізу спільного використання як експериментальних методів дослідження, так і методів чисельного моделювання.

Навіть в досить простому (для вказаних приладів) випадку відбиття пласких ударних хвиль від вісесиметричних увігнутих поверхонь існуючі дані [15, 16] експериментальних досліджень не дозволяють зробити однозначного висновку:

- про характер процесу відбиття стрибків ущільнення від перешкоди;
- про зміну параметрів газового потоку за відбитими від перешкоди стрибками ущільнення.

Основними факторами, які впливають на параметри газового потоку імпульсної струмини являються:

- інтенсивність стрибків ущільнення, що взаємодіють з перешкодою;
- кутові характеристики орієнтації перешкоди.

На основі аналізу отриманих експериментальних даних можна виділити наступні етапи взаємодії трансзвукової газової струмини з перешкодою (дивись рисунок 2.1):

- плавне викривлення фронту падаючої ударної хвилі біля поверхні

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

стілки каналу з виникненням відбитої ударної хвилі стискання;

- посилення хвилі стискання і при перевищенні деякого характерного кута з неї формується відбита ударна хвиля;

- на фронті стрибка, що взаємодіє з перешкодою, виникає точка зламу, яка утворює конфігурацію з “маховською ніжкою”, яка забезпечує поворот потоку до вісі, який рухається за первинною ударною хвилею. При цьому число Маха та орієнтація “маховської ніжки” відносно перешкоди визначаються параметрами первинної ударної хвилі;

- перед досягненням поверхні перешкоди “махівська ніжка” зникає, і відбиття стрибків ущільнення набуває регулярного характеру;

- процес формування зворотної течії за відбитою хвилею після відбиття від поверхні перешкоди первинної ударної хвилі.

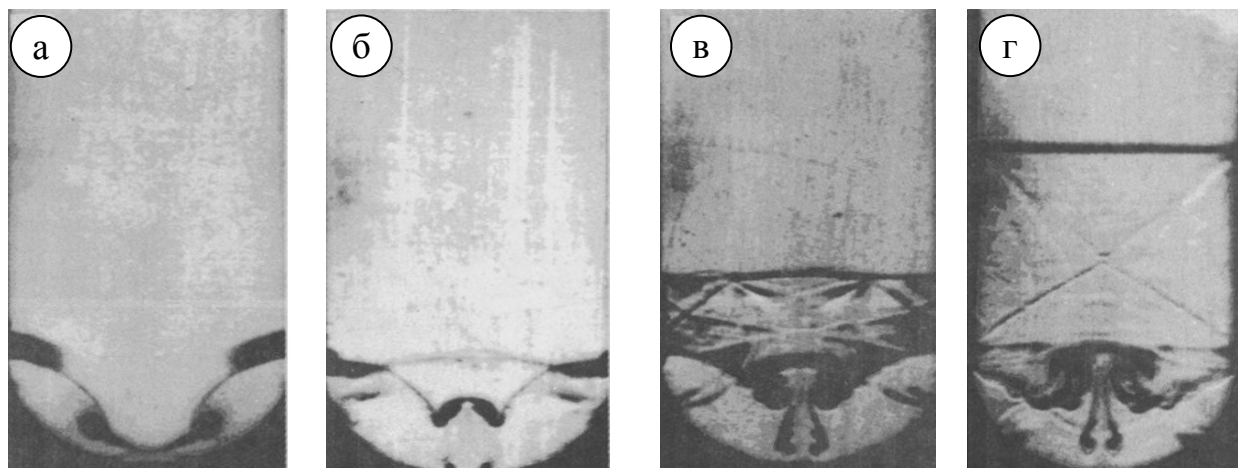


Рисунок 2.1 – Етапи взаємодії газової транс звукової струмини з перешкодою

а – взаємодія первинних стрибків з перешкодою; б – формування зворотної течії за відбитими стрибками; в – поява “грибоподібної” дозвукової області; г – зворотна течія “розширюваної” струмини.

Вторинне зростання тиску можна пояснити натіканням газу, який рухається вздовж поверхні перешкоди при відбитті первинної ударної хвилі, в об’єм поблизу вісі симетрії за відбитою хвилею. Цей рух відбувається з прискоренням, що призводить до інтенсивного стискання об’єму газу біля перешкоди. В точці цього об’єму, який називається фокусом, газодинамічні параметри досягають свого максимального значення. Ця точка знаходиться на

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

деякій відстані як від перешкоди, так і від вісі симетрії, що забезпечує компенсацію вихрового руху. Розширення газу породжує ударну хвилю розвантаження, яка в результаті і утворює відбитий стрибок ущільнення.

Після цього починається процес формування відбитого від перешкоди стрибка ущільнення. Ударна хвиля розвантаження взаємодіє з елементами первинної відбитої ударної хвилі на периферії перешкоди, гальмує та захоплює газ біля поверхні порожнини в зворотний рух. Після виходу в канал криволінійний фронт хвилі розвантаження на відстані біля двох калібрів сопла ( $2 \cdot d_{кр}$ ) набуває пласкої форми.

Відбиття плоскої первинної ударної хвилі від циліндричної та сферичної порожнин має однакову якісну структуру і відрізняється в основному кількісними даними, які характеризують екстремальне значення параметрів. Для сферичної порожнини ці значення порівняно вище, що пояснюється, ймовірно, великим стиском середовища при натіканні в порожнину на першому етапі відбиття. Крім того, «маховські ніжки» утворюють циліндричну ударну хвилю, що сходиться, після відбиття первинної хвилі від дна порожнини, що також сприяє помітному підвищенню параметрів газу в газодинамічному фокусі.

Розподілення параметрів газу по поверхні тіла з великою точністю визначається в результаті рішення задачі про взаємодію надзвукової струмینی з тілом. В даний час отримані чисельні рішення декількох варіантів цієї задачі. Всі вони являються достатньо трудомісткими та передбачають використання ЕВМ. Простим способом розрахунку тиску струмینی на перешкоду являється метод Ньютона. Однак в течіях з ударними хвилями можливості його використання обмежені.

Оскільки не завжди виходить отримати розподілення тиску на поверхні тіла, скористаємося залежністю:

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$N = - \int_S p \cdot \bar{n} \cdot dS \quad (2.1)$$

Часто застосовується спосіб визначення сумарної сили, заснований на використанні закону кількості руху. При використанні цього закону необхідно знати параметри газу на ділянках контрольного об'єму, який виділяється в потоці. Ця обставина ускладнює отримання розрахункової залежності для сили, яка діє на перешкоду кінцевих розмірів, так як доводиться робити деякі припущення про характер руху газу на тих ділянках, де параметри течії невідомі.

Розглянемо схему течії при взаємодії струмини зі сферичною перешкодою, поперечні розміри якої близькі з діаметром струмини (дивись рисунок 2.2). В цьому випадку перед перешкодою утворюється стрибок ущільнення, який взаємодіє з «вісячим» стрибком вільної струмини. В результаті утворюється відбитий стрибок та контактна поверхня.

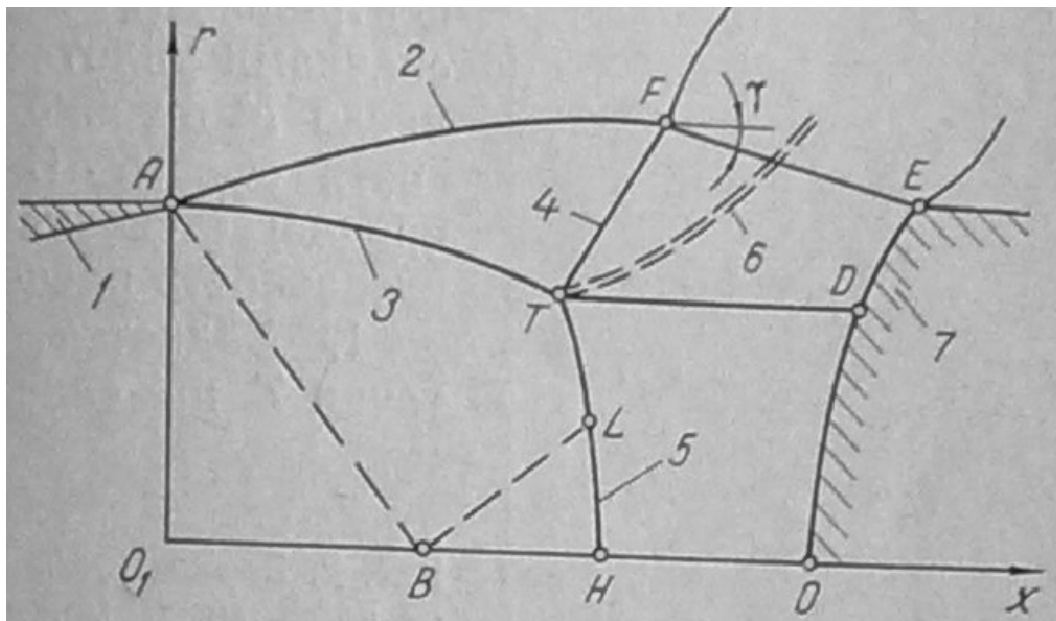


Рисунок 2.2- Схема взаємодії струмини з перешкодою

1 – сопло; 2 – межа струмини; 3 – «вісячий» стрибок; 4 – відбитий стрибок;  
5 – центральний стрибок; 6 – поверхня контакту; 7 – перешкода

Газ, який пройшов «вісячий» і відбиті стрибки ущільнення, залишається, як правило, надзвуковим, а газ, який пройшов центральний

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	025.150048.MP.2020.001				

стрибок ущільнення, стає дозвуковим. Відбитий стрибок взаємодіє з ділянкою струмини, викликаючи її злам та розтікання потоку.

Як впливає з останньої залежності, для розрахунку  $N^*$  необхідно знати, окрім параметрів течії на зрізі сопла, параметри струмини за центральним та відбитим стрибками ущільнення, а також число  $M$  в точці  $E$  на поверхні сфери.

У зв'язку з цим пропонується така послідовність розрахунку:

1. Задається положення точки  $T$  на «висячому» стрибку ущільнення. (Течія у вільній струмині вважається відомою.) Розраховується її околиця.
2. Центральний стрибок ущільнення апроксимується квадратичною параболою, коефіцієнти якої визначаються через параметри струмини в точках  $T$  (координати та кут нахилу стрибка) і  $H$  (кут нахилу стрибка). Визначаються параметри в точці  $H$ .
3. Відбитий стрибок  $TF$  апроксимується прямою лінією.
4. Визначається точка перетину стрибка  $TF$  з границею струмини.
5. З умови рівноваги витрати через центральний стрибок та переріз  $TD$  знаходиться взаємне положення  $\delta_{TD}$  стрибків ущільнення і сферичної перешкоди:

$$\delta_{TD} = \frac{\eta \cdot q(M_0)}{r_T \cdot [q(M_T) \cdot \sigma_T \cdot \sin \theta_T + q(M_D) \cdot \sigma_D \cdot \sin \theta_D]}, \quad (2.2)$$

де  $\eta$  - ордината додаткової площини, м;

$q(M_0)$ ,  $q(M_T)$ ,  $q(M_D)$  - газодинамічні функції у характерних точках струмини;

$M_0$  - число Маха у вихідному отворі сопла;

$M_T, M_D$  - число Маха у характерних точках струмини;

$r_T$  - радіальна координата у точці  $T$ , м;

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	025.150048.MP.2020.001				

$\sigma_T, \sigma_D$  - відношення тисків гальмування на стрибкі ущільнення у характерних точках струмини;

$\theta_T, \theta_D$  - кут нахилу вектора швидкості до вісі струмини у характерних точках струмини.

Величини з індексом T відносяться до параметрів течії зі сторони дозвукової області.

Число  $M_D$  або знаходиться по модифікованій формулі Ньютона:

$$\pi(M_D) = \sin^2 \theta_D, \quad (2.3)$$

де  $\pi(M_D)$  - газодинамічна функція у характерній точці струмини. або знаходиться із закону кількості руху, який застосований до області, яка обмежена стрибком TH і утворюючою TD. Крім того, для визначення величини  $M_D$  можна використати умову:

$$(\rho \cdot v_n)_{TD} = \text{const}, \quad (2.4)$$

де  $\rho$  - густина, кг/м<sup>3</sup>;

$v_n$  - швидкість у характерній точці струмини, м/с.

Усі три варіанти визначення величини  $M_D$  дають близькі результати.

6. Визначається число  $M_E$  або по формулі (2.2), або при умові, що параметри в точці E критичні. В останньому випадку:

$$M_E = 1, \quad \pi(M_E) = \left[ \frac{2}{k+1} \right]^{\frac{k}{k-1}}, \quad (2.5)$$

де  $M_E$  - число Маха у характерній точці струмини;

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$\pi(M_E)$ - газодинамічна функція у характерній точці струмини.

7. Розраховується із співвідношення (2.6) сумарна сила, діюча на сферичну перешкоду:

$$N^* = 1 + \frac{1}{k \cdot M_a^2} - \frac{1}{k \cdot M_a^2 \cdot n} + \frac{\xi(M_F) \cos \theta_F + \xi(M_E) \cos \theta_E}{2 \cdot \xi(M_a)} - \frac{(r_F^2 - r_E^2) \cdot (k - 1)}{\varepsilon(M_a) \cdot \xi^2(M_a) \cdot 4 \cdot k} [\pi(M_F) \cdot \sigma_F - \pi(M_E) \cdot \sigma_E] + \frac{r_F^2 - r_E^2}{k \cdot M_a^2 \cdot n}, \quad (2.6)$$

де  $k$  - відношення питомих теплоємкостей;

$\xi(M_F)$ ,  $\xi(M_E)$ ,  $\xi(M_a)$ ,  $\varepsilon(M_a)$  - газодинамічні функції у характерних точках струмини де радіальні координати віднесені до радіусу сопла на виході.

Слід відзначити, що розглянута схема течії характеризує режим стійкої взаємодії струмини з перешкодою. Відомо [15], що при відповідному положенні перешкоди в струмині стійкий характер течії порушується: стрибки ущільнення коливаються перед перешкодою з високою частотою. Положення  $x_*$ , з якого починається нестійке обтікання, можна визначити по емпіричний залежності:

$$x_* = 1,4 \cdot M_a \cdot \sqrt{k \cdot n} (1,26 - 0,17 \cdot M_a) \quad (2.7)$$

де  $n$  - міра нерозрахованості струмини;

$M_a$  - число Маха на зрізі сопла.

Взаємодія надзвукової струмини з перешкодою характеризується виникненням центрального стрибка ущільнення 4 в струмині перед перешкодою (дивись рисунок 2.3). Перетин центрального стрибка 4 з висячим стрибком ущільнення 5 призводить до утворення відбитого стрибка 6 та поверхні тангенціального розриву 7 (тобто до утворення потрійної

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



[14,15].

Хвилева структура в струмині перед перешкодою коливається з більшою частотою і на світлинах сильно розмита. Нестійкий режим взаємодії струмини з перешкодою супроводжується генерацією інтенсивних звукових хвиль в оточуючому середовищі. Виміри тисків [14,15] показали, що виникнення сильної нестійкості зв'язане з появою периферійного максимуму тиску на перешкоді. При великих значеннях степені нерозрахунковості  $n$  руйнування хвилевої структури не спостерігалось, хоча еюра статичних тисків на перешкоді мала периферійний максимум:

- по мірі збільшення нестійкості хвилевої структури зменшується та на деякій відстані перешкоди від сопла, стрибки ущільнення стають стаціонарними;

- на деяких режимах течії струмини спостерігався період другої нестійкості течії ( $h = h_{2H}$ ). Амплітуда коливань хвилевої структури та інтенсивність акустичного поля значно менше, ніж на режимі першої нестійкості;

- за слабкою нестійкістю слідує стрибкоподібний перехід до стійкого режиму взаємодії струмини з перешкодою ( $h = h_*$ ). При цьому структура ударних хвиль відповідає положенню ударних хвиль в першій “бочці” затопленої струмини, а перед перешкодою виникає другий центральний стрибок ущільнення. Периферійний максимум тиску на перешкоді існує по всьому діапазону  $h_{1H} \leq h \leq h_*$ . При великих степенях нерозрахунковості він існує і при  $h \geq h_*$ .

$$\frac{h_{1H}}{x_M} = 1,26 - 0,17 \cdot M_a \quad (2.8)$$

$$\frac{h_{1H}}{d_a \cdot M_a \cdot \sqrt{k \cdot n}} = 0,88 - 0,12 \cdot M_a \quad (2.9)$$

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де  $h_{1H}$  - початок сильної (першої) нестійкості;

$x_M$  - відстань від зрізу сопла до маховського диска, м;

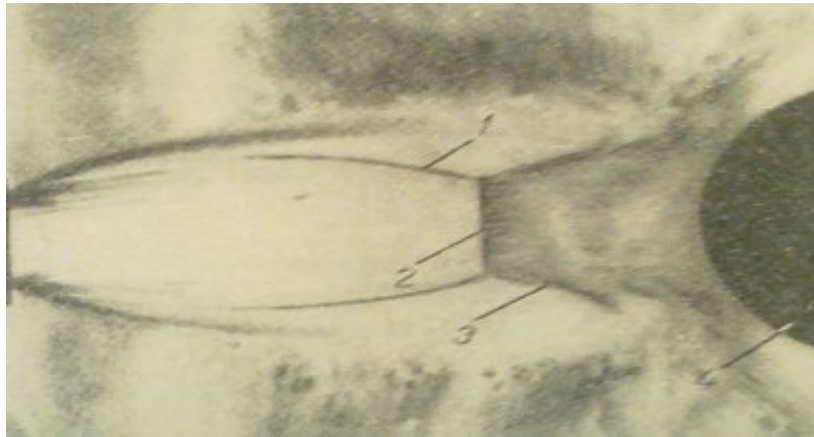


Рисунок 2.4- Структура ударних хвиль у надзвуковій струмині, що обтікає перешкоду

1 – висячий стрибок; 2 – центральний стрибок; 3 – відбитий стрибок; 4 – перешкода

$d_a$  - діаметр вихідного перерізу сопла, м.

Як відомо, хвилева конфігурація першої «бочки» вільної недорозширеної струмини з нерегулярним відбиттям складається з висячого 1, центрального (махового диска) 2 і відбитого 3 стрибків (див. рисунок 2.4). Відбитий та центральний стрибки є наслідком розпаду висячого стрибка в деякій його точці. При достатньо далекому положенні перешкоди в струмині вона не надає ніякого впливу на хвилеву структуру першої бочки. Якщо ж наближати перешкоду до сопла, то, починаючи з деякого її положення  $x_*$ , вона починає впливати на хвилеву конфігурацію. Цей вплив виражається в зміщенні точки розпаду по висячому стрибку.

Положення центрального стрибка у вільній струмині  $x_*$  визначається з будь-якої із відомих апроксимуючих залежностей [15]

$$x_0 = 0.69 \cdot M_a \cdot \sqrt{k \cdot n} \quad (2.10)$$

де  $k = c_p / c_v$ .

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Відсутність точних аналітичних методів, які дозволяють повністю визначити структуру недорозширеної струмини, надзвичайна трудомісткість методу характеристик, а також неповнота отримуваних з його допомогою результатів викликали необхідність розвитку експериментальних робіт. Авторами досліджувались газові струмини, що витікають в затоплене середовище при зміні параметрів в межах:  $M_a=1...4,85$ ;  $P_a/P_\infty=10...10^4$ ;  $x=1,3...1,67$ ;  $T_0=289...700$  К;  $\alpha=8...21^\circ$ .

Дослідження проводилися у вакуумній аеродинамічній трубці при імпульсному режимі, що вимагало малоінерційну систему вимірювання та запис параметрів. Для вимірювання тисків застосовувались індукційні датчики та датчики опору, температура вимірювалась термопарою; сигнали датчиків записувалися шлейфовим осцилографом. В результаті отримана залежність для відстані до центрального стрибка [17]:

$$\frac{x_0}{d_a} = 3,2 \frac{M_a^2}{M_a^2 + 1} n^{0,39} \quad (2.11)$$

де  $x_0$  - відстань від зрізу сопла до центрального стрибка, м.

Досліди показали наступне:

- не виявлена залежність відстані до центрального стрибка від  $x$  ( в межах  $x=1,3...1,67$ , від кута напіврозкриття сопла при  $\alpha=8...21^\circ$ , від температури газу при  $T_0=289...700$  К.

- основними параметрами, які визначають положення центрального стрибка, являються степінь нерозрахунковості  $n = P_a/P_\infty$  та число  $M_a$ .

- дослідно відмічений найменш інтенсивний ріст величини  $x_0/d_a$  при збільшенні співвідношення в порівнянні з даними [14...18].

- при значеннях  $M_a \geq 3,5$  головним фактором, який визначає положення центрального стрибка, стає співвідношення  $n=P_a/P_\infty$ .

Для деяких практичних задач необхідно знання параметрів за

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

центрального стрибком. При великих степенях недорозширення, коли перед центральним стрибком число  $M \gg 1,0$ , задача визначення параметрів за центральним стрибком може бути спрощена. Якщо прийняти, що потік уздовж вісі струмини від зрізу сопла до центрального стрибка являється одновимірним та ізоентропним і що для центрального стрибка справедливі співвідношення, виведені для прямого стрибка, можна довести, що, починаючи з  $M=5 \dots 6$  та до  $\infty$ , величина  $M_1$  стає практично постійною.

Число  $M_1$  виражається через  $M$  за допомогою співвідношення:

$$M_1 = \sqrt{\frac{2 + (\chi - 1) \cdot M^2}{2 \cdot \chi \cdot M^2 - (\chi - 1)}} = \sqrt{\frac{\frac{2}{M^2} + (\chi - 1)}{2 \cdot \chi - \frac{\chi - 1}{M^2}}} \quad (2.12)$$

В багатьох струминних задачах розглядаються питання взаємодії надзвукової струмини зі стінкою або виходом у канал. Відомий інтерес представляє також взаємодія декількох газових струмин, особливо якщо в результаті утворюється замкнута область. На практиці прикладом можуть бути газові ежектори (особливо при відсутності ежектуемого потоку та довжини камери змішування, недостатньої для повного перемішування потоків), робочі області аеродинамічних труб. Особливе місце в подібних задачах займає питання про утворення «донного» тиску в області, яка обмежена декількома струминами.

У всіх задачах подібного типу буває цікаво дізнатися так звану приєднану масу струмини. Струмина газу, що розповсюджується в спокійному або середовищі що рухається, взаємодіє з нею своєю межею. Часточки, що знаходяться на периферії струмини, зіштовхуючись зі спокійними часточками оточуючого середовища, передають їм частину своєї енергії, збуджуючи швидкість, яка направлена уздовж вісі струмини.

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таким чином, по мірі віддалення від вихідного перерізу сопла маса повітря, що складає власну струмину, безперервно зростає та на деякій відстані від нього має величину:

$$G = G_0 + G_{\text{пр}} = G_0 \cdot (1 + \overline{q_{\text{пр}}}), \quad \overline{q_{\text{пр}}} = \frac{G_{\text{пр}}}{G_0} \quad (2.13)$$

де  $G$  - витрата в довільному перерізі струмینی, кг/с;

$G_0$  - витрата газу, який витікає із сопла, кг/с;

$G_{\text{пр}}$  - кількість газу, який приєднався до струмینی (по мірі розповсюдження його від зрізу сопла до деякого фіксованого перерізу) із оточуючої струмینی, кг/с;

$\overline{q_{\text{пр}}}$  - відносна приєднана маса, кг.

Приєднана маса у випадку струмینی на розрахунковому режимі (тобто там, де відомий закон розподілення швидкості та густини по вісі  $i$  в кожному перерізі) може бути легко розрахована теоретично [14].

У випадку надзвукової струмینی, що витікає із сопла при нерозрахунковості витікання  $n = p_k / p_a$ , відмінною від одиниці, теоретичне визначення приєднаної маси ускладнено складною структурою струмینی на початковій ділянці.

Приєднана маса струмینی  $G_{\text{пр}}$  в даному перерізі очевидно залежить від динамічних характеристик струмینی (чисел  $M$ ) та величини її поверхні від вихідного перерізу сопла до даного перерізу. На одній і тій же відстані від виходу із сопла величина поверхні залежить від степені нерозрахунковості витікання, збільшуючись з її ростом. Таким чином, для струмینی, що розповсюджується в спокійному середовищі.

$$G_{\text{пр}} = f(n, M_a, \overline{X}) \quad (2.14)$$

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Як з'ясувалось в результаті обробки експериментальних даних (див. рисунок 2.5), відносна приєднана маса не залежить від числа  $M_a$ , а залежить тільки від степені нерозрахунковості витікання.

Цей факт може бути пояснений тим, що основною динамічною характеристикою, яка визначає змішування струмин, являється очевидно число  $M$  на межі струмини, а воно, як відомо, є функцією тільки відношення тиску перед соплом до тиску в оточуючому середовищі, тобто по суті нерозрахунковості витікання. Наявний розкид експериментальних точок при малих значеннях нерозрахунковості  $n$  може бути пояснено не врахуванням впливу стискування при визначенні швидкостей, коли швидкість потоку в зворотній течії наближається до критичної.

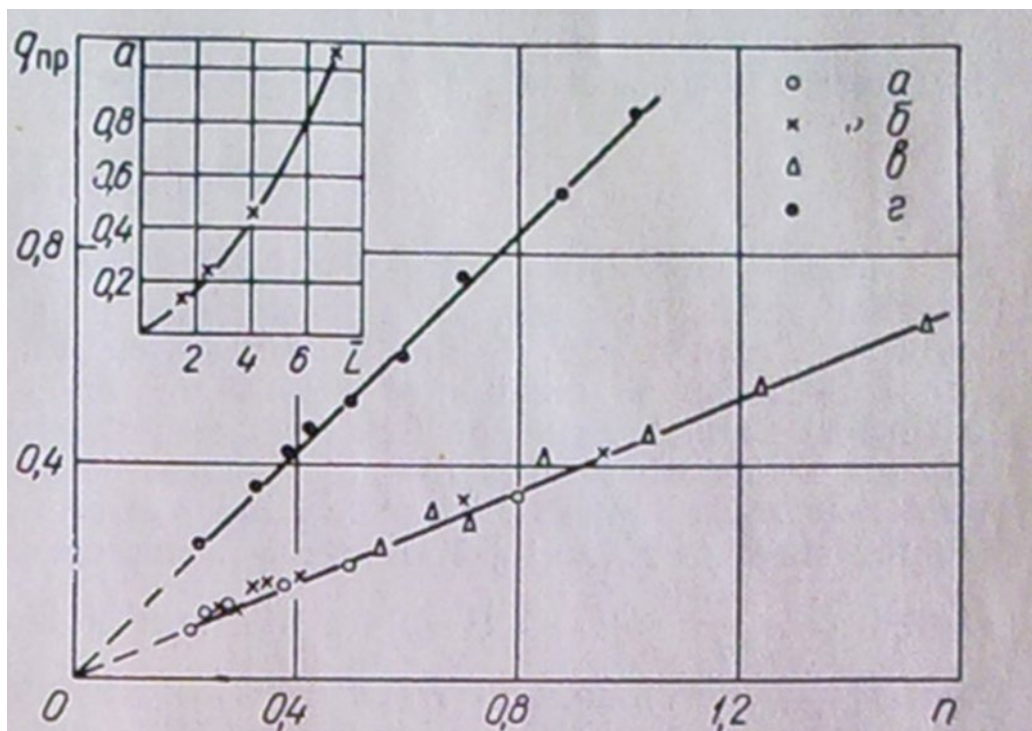


Рисунок 2.5- Залежність відносної приєднаної маси від  $n$  ( $\bar{q}_{пр} = an$ ) при  $M_a = 2,02$ ;  $\bar{L} = 4,0$  (а),  $2,45$  і  $4,0$  (б),  $2,85$  і  $4,0$  (в),  $2,45$  і  $7,0$  (г) і залежність  $a$  від  $\bar{L}$  ( $a = 0,0502 \bar{L}^{-1,57}$ ) при  $M_a = 2,45$ ,  $\bar{D} = 6,5$ ,  $f_b = 16$

Дослідження впливу довжини струмини на величину  $\bar{q}_{пр}$  показали, що для любой довжини (в межах початкової ділянки) залежність  $\bar{q}_{пр}$  від  $n$  лінійна,

а кутовий коефіцієнт прямих являється функцією відстані  $\bar{X}$  від вихідного перерізу сопла до розглядаємого перерізу струмини (див. рисунок 2.5).

Експериментальна залежність приєднаної маси на початковій ділянці надзвукової не розрахункової струмини добре апроксимується вираженням:

$$\bar{q}_{\text{пр}} = 0,0502 \cdot n \cdot L^{-1,57} \quad (2.15)$$

Останнім часом з'явився ряд робіт [14...16] по дослідженню взаємодії недорозширеної надзвукової струмини, яка натікає на безмежну плоску перешкоду, яка встановлена перпендикулярно вісі струмини на малій відстані від зрізу сопла, коли максимум статичного тиску розташований в центрі перешкоди. В цьому випадку типовою схемою розташування ударних хвиль являється схема, приведена на рисунку(див. рисунок 2.6).

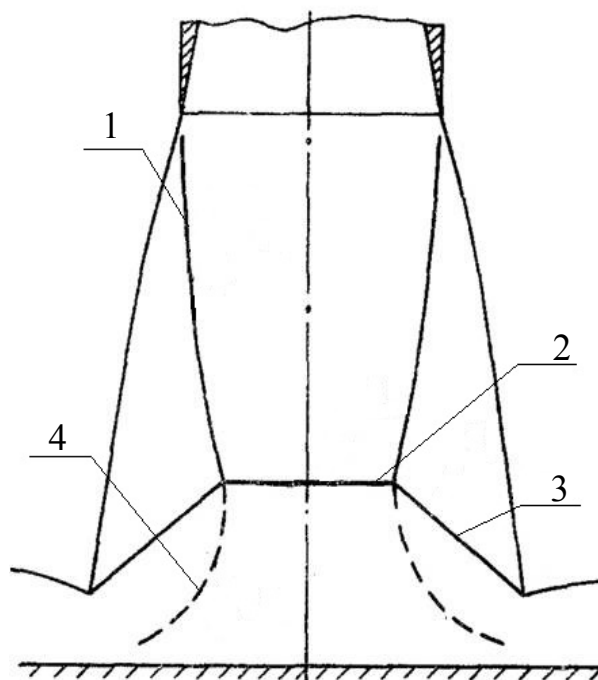


Рисунок 2.6- Схема хвильової структури взаємодії надзвукової недорозширеної струмини з перешкодою

1 – висячий стрибок; 2 – центральний стрибок; 3 – відбитий стрибок; 4 – тангенційний розрив

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Перед перешкодою утворюється центральний стрибок ущільнення 2, який, перетинаючись з висячим стрибком вільної струмини 1, призводить до утворення відбитого стрибка 3. Дозвукова течія за центральним стрибком відділена від звичної надзвукової течії за відбитим стрибком поверхнею тангенційного розриву 4. Відбитий стрибок 3 виходить на межу струмини в точці В, викликає її злам та інтенсивне розтікання струмини уздовж поверхні перешкоди у вигляді віялової струмини.

При віддаленні перешкоди від зрізу сопла може наступити режим «звукової вібрації», походження та механізм якої ще остаточно не вивчені. Також не з'ясована фізична картина течії в тому випадку, коли максимальна величина статичного тиску має місце не в центрі перешкоди, а на периферії. Для з'ясування цих складних питань були проведені експериментальні дослідження взаємодії струмини з безмежною плоскою перешкодою. Дослідження проводилися на надзвукових повітряних струминах при різноманітних числах Маха на перерізі сопла  $M_a=1,5...2,5$ , степенях нерозрахунковості  $n=1,5...12$  та відстанях від перерізу сопла  $\bar{h} \geq 3$ . За допомогою оптичного приладу ІАБ-451 проводилося фотографування хвилевої структури взаємодії струмини з перешкодою.

Для виміру статичного тиску перешкода мала отвори діаметром 0,3 мм. Вимірювання повного тиску здійснювалося за допомогою малогабаритної трубки Піто, приймаючий отвір якого мав прямокутну форму розміром  $1,6 \times 0,08$  мм<sup>2</sup> з товщиною стінок 0,06 мм. Тиск вимірювався індуктивними датчиками ДД-10 у комплекті з вимірювальним пристроєм ІД-2І із записами результатів на шлейфовому осцилографі Н-109. Для отримання неперервного розподілення статичного та повного тиску перешкода під час продувки переміщувалась у своїй площині зі швидкістю 6 мм/с. Переміщення перешкоди фіксувалось датчиком шляху через 0,5 мм ходу перешкоди. Сумарна похибка вимірів, включаючи обробку осцилограм, не перевищувала 4%.

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Візуалізація течії в пристінному пограничному шарі на перешкоді проводилася за допомогою впорскування речовини, що не замерзає (веретенне масло). У напрямку розтікання масляної плівки візуально визначався напрям потоку на перешкоді. Поруч з впорскуванням рідини, що не замерзає, для візуалізації течії в потік встановлювалися нитяні зонди, які також дозволяли судити про напрям течії. За допомогою нитяних зондів вдалося отримати якісну картину течії газу поза пристінного пограничного шару.

Оскільки у досліджуваному діапазоні зміна параметрів струмини та відстані  $\bar{h}$  якісна картина взаємодії струмини з перешкодою зберігалася, то для ілюстрації результатів в подальшому приводяться дані, отримані при  $M_a = 2,185$ ,  $\nu_a = 5^0$ ,  $r_a = 15\text{мм}$ ,  $n = 1,9$ . Відстань від вихідного перерізу сопла до перешкоди  $\bar{h}$  змінювалася від 2,8 до 6,8 з кроком 0,4.

На відстані  $\bar{h} \leq 3,6$  крива статичного тиску має максимум у центрі перешкоди та поступово спадає до периферії аж до можливої зони відриву пограничного шару струмини від поверхні перешкоди.

На відстані  $\bar{h} \geq 3,6$  на перешкоді з'являється периферійний максимум статичного тиску. При цьому тиск у центрі перешкоди із зростанням  $\bar{h}$  падає, а периферійний максимум тиску мало змінюється по величині. Це можливо пояснити тим, що в міру збільшення  $\bar{h}$  число Маха перед центральним стрибком ущільнення збільшується, а отже, збільшуються втрати повного тиску на ньому, і тиск у центрі перешкоди зменшується. Втрати ж повного тиску газу, який пройшов косі стрибки ущільнення 1 та 3 показані на рисунку 3.6, залишаються меншими, ніж газу, який пройшов центральний стрибок. Крім того, так як по мірі збільшення відстані  $\bar{h}$  витрата газу через стрибок 3 збільшується, а через центральний стрибок 2 зменшується, то лінія тангенційного розриву 4 все ближче підходить до поверхні перешкоди.

Внаслідок названих причин на деякому  $\bar{h}$  зона змішування потоків, яка розвивається уздовж тангенційного розриву, замикається на поверхні

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

перешкоди та призводить до появи периферійного максимуму статичного тиску на перешкоді. При цьому частина газу, який пройшов центральний стрибок ущільнення, захоплюється в зону змішування та залишає центральну область, а інша частина не може здолати тиск периферійного максимуму та накопичується в центральній області. Тиск у ній збільшується і центральний стрибок 2 починає переміщуватися вгору по потоку до тих пір, поки тиск за ним не стане декілька більше периферійного максимуму. З цього моменту газ, який накопичився у центральній області перешкоди, має можливість покинути її, тиск за центральним стрибком падає і він починає рухатися вниз по потоку до первинного положення. Далі процес повторюється та реалізується нестационарна взаємодія струмини з перешкодою. Переміщення стрибка проходить з великою частотою, тому на тьоплерівських знімках хвилева структура струмини стає розмитою (див. рисунок 2.7 б, в).

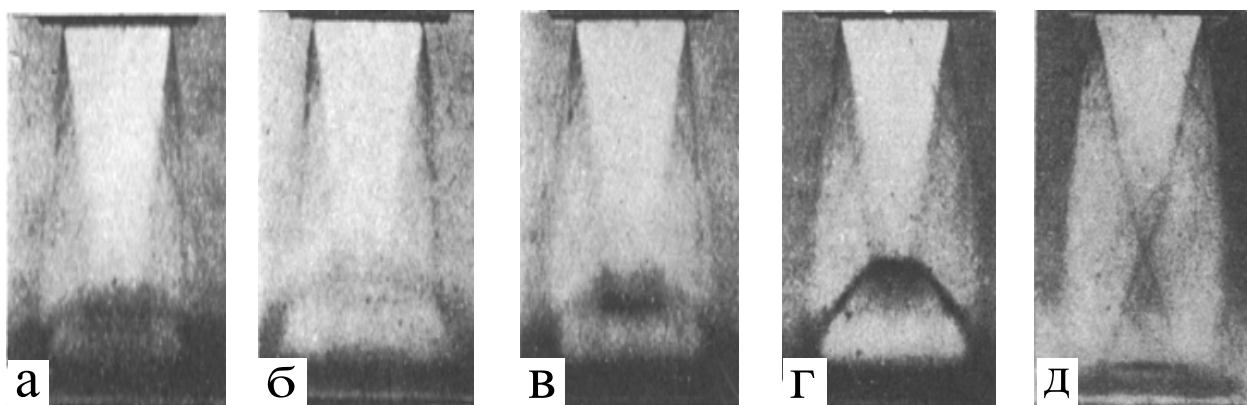


Рисунок 2.7- Тьоплерівські фотознімки взаємодії струмини з перешкодою

З подальшим ростом  $\bar{h}$  відхід стрибка від перешкоди і довжина зони змішування збільшуються, все більша частина газу, який пройшов стрибок 2 (дивись рисунок 2.6), захоплюється потоком газу в зоні змішування та покидає центральну область перешкоди. При цьому амплітуда та частота коливань стрибка 2 зменшуються (дивись рисунок 2.7 в). На деякому  $\bar{h}$  увесь газ, який пройшов центральний стрибок ущільнення, за рахунок змішування з периферійним потоком покидає центральну область. Взаємодія струмини з перешкодою стає стійкою (дивись рисунок 2.7 г).

Візуалізація течії за допомогою впорскування рідини та нитяних зондів

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

показує, що в цьому випадку є поворотна течія до центра перешкоди. Якщо на режимах до появи нестійкості ( $\bar{h} \leq 4$ ) тиск, виміряний за допомогою трубки Піто, каже про наявність течії від центру, то при  $\bar{h} \geq 5,6$ , відповідних стаціонарному обтіканню перешкоди при наявності периферійного максимуму, результати виміру тиску гальмування вказують на течію до центра перешкоди. Положення лінії розтікання, яка обмежує область поворотної течії до центра перешкоди, яке визначене по рівності статичного та повного тисків, практично співпадає з результатами візуалізації шляхом впорскування рідини що не замерзає.

Спрощена картина течії, яка відповідає стаціонарній взаємодії струмини з перешкодою, при наявності периферійного максимуму тиску зображена на рисунку (дивись рисунок 2.8). Газ, який пройшов центральний стрибок ущільнення 2, в зоні змішування 4, який розвивається уздовж поверхні тангенційного розриву, переміщується з газом, який пройшов стрибок 3. При цьому його повний тиск збільшується настільки, що він може здолати периферійний максимум статичного тиску та покинути центральну область перешкоди. Однак частина газу з області змішування 5 біля лінії розтікання R повертає і тече до центра перешкоди, утворюючи застійний вихровий рух. Газ із застійної області змішується в зоні 5 з потоком, який пройшов центральний стрибок ущільнення, а потім у зоні 4 і з периферійним потоком. Тому частина газу застійної області покидає її, а в застійну зону від лінії розтікання R поступає нова порція газу.

Подібна картина течії має місце аж до відстані  $\bar{h} \leq 6,8$ , після чого відбуваються стрибкоподібні зміни як у хвилевій структурі струмини перед перешкодою (дивись рисунок 2.7 д), так і в епюрі статичних тисків. У струмині перед перешкодою виникає стрибок ущільнення на невеликому віддаленні від поверхні перешкоди, а хвилева структура струмини в межах першої бочки відповідає хвилевій структурі вільної затопленої струмини. Розподіл статичного тиску характеризується максимумом у центрі перешкоди

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

та поворотну течію в центральній області перешкоди відсутнє.

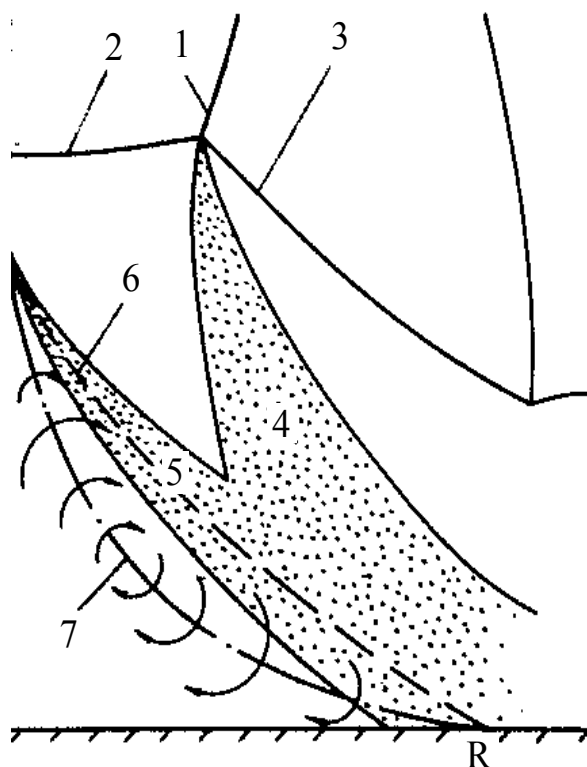


Рисунок 2.8- Схема течії при стаціонарному режимі та при наявності периферійного максимуму тиску

1,2,3 – висячий, центральний та відбитий стрибки ущільнення відповідно;  
4,5 – зона змішування; 6 – розділяюча лінія току; 7 – лінія нульових повздовжніх швидкостей

Проведене детальне експериментальне дослідження дозволяє дати достатньо чітке описання якісної картини взаємодії надзвукової струмینی з плоскою перешкодою при різноманітних відстанях перешкоди від перерізу сопла, що дозволить в подальшому побудувати математичну схему розрахунку вказаної взаємодії та виникнення нестійких режимів.

2.2 Розв'язання задачі математичного моделювання процесу взаємодії повітряної струмینی з поверхнею.

Структура вільної струмینی та струмینی в області її взаємодії з перешкодою у вигляді тупикового каналу досить складна внаслідок утворення стрибків ущільнення.

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Серед декількох відомих схем плин у вільній струмині та взаємодії струмини газу з поверхнею зливка [38...42] при математичному моделюванні використовувались схеми [38, 39], суміщення яких наведено на рисунку 2.9, оскільки вони найбільше наближені до процесу взаємодії повітряної струмини з поверхнею зливка.

Параметри повітря на зрізі сопла: статичний тиск  $P_{ст}$ , температура гальмування  $T_0^*$ , швидкість витікання струмини з сопла  $u_0$  та міра нерозрахованості струмини  $n$  визначаються за відомими залежностями [43]:

$$P_{ст} = \frac{P_c}{\left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} \cdot M_0^2\right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}} \quad (2.16)$$

де  $M_0$  - число Маха у вихідному отворі сопла; тиск повітря перед соплом, Па;

$\kappa$  - показник адіабати повітря.

$$n = \frac{P_{ст}}{P_{атм}} \quad (2.17)$$

Температура гальмування повітря на зрізі сопла визначається з рівняння стану ідеального газу, виходячи з умови рівності температури гальмування в будь-якому його перерізі [43]:

$$T_0^* = \frac{P_c}{\rho_c \cdot R} \quad (2.18)$$

де  $\rho_c$  - густина повітря перед соплом, кг/м<sup>3</sup>;

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

R - газова стала, Дж/(кг · К).

$$u_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot \kappa}{\kappa + 1} \cdot R \cdot T_0^*} \quad (2.19)$$

Розподіл осьової швидкості в надзвуковій області течії вільної струмини [39]:

$$u_n = \frac{13 \cdot \sqrt{M_{\text{еф}}^2 - 1} \cdot \left( \frac{d_{\text{еф}}}{d_0} \right) \cdot u_0}{\bar{x} - \bar{S}} \quad (2.20)$$

де  $M_{\text{еф}}$ - число Маха на осі струмини в її “ефективному” перерізі;

$d_{\text{еф}}$ - діаметр “ефективного” перерізу струмини, м;

$\bar{x}$  - відносна поточна координата уздовж осі тупикового каналу;

$\bar{S}$  - відносна довжина початкової (газодинамічної) ділянки струмини.

Лінійні величини виражені в діаметрах вихідного перетину сопла  $d_0$  і відмічені рискою над символом.

Число Маха на осі струмини в її “ефективному” перерізі [44]:

$$M_{\text{еф}} = \sqrt{\frac{F_0}{F_{\text{еф}}} \cdot \left( M_0^2 \cdot n \cdot \cos^2 \alpha_0 + \frac{n-1}{\kappa} \right)} \quad (2.21)$$

де  $F_0$  - площа вихідного отвору сопла, м<sup>2</sup>;

$F_{\text{еф}}$  - площа “ефективного” перерізу струмини, м<sup>2</sup>;

$\alpha_0$  - кут між напрямом абсолютної швидкості газу на виході з сопла та віссю газового потоку, рад.

В свою чергу, діаметр “ефективного” перерізу струмини [45]:

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

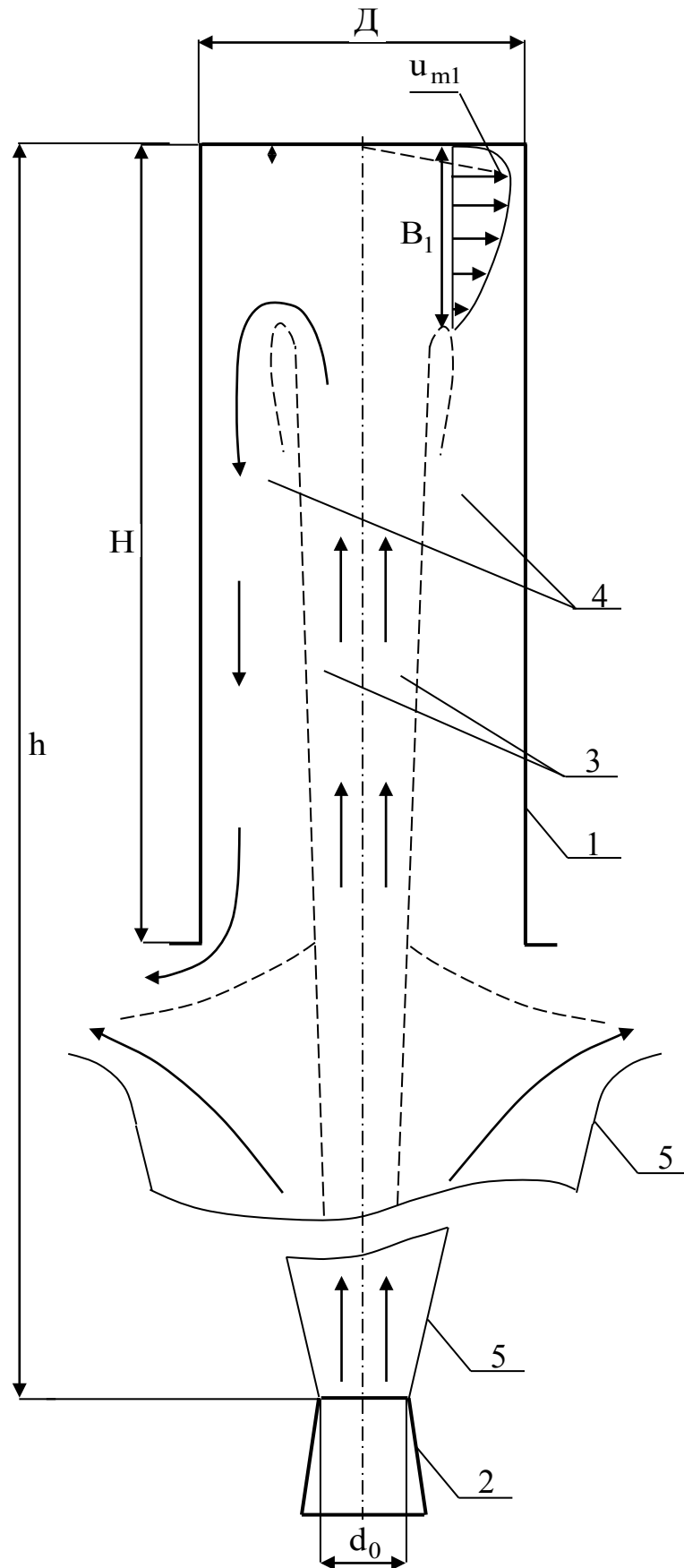


Рисунок 2.9- Схема взаємодії газової струмини з тупиковим каналом:  
 1- тупиковий канал; 2- сопло; 3- область плинину струмини в тупиковий канал;  
 4- область витискування повітря з тупикового каналу; 5- границя вільної  
 повітряної струмини.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

025.150048.MP.2020.001

Арк.

$$d_{\text{эф}} = d_0 \cdot n^{0.6} \quad (2.22)$$

Відносна довжина початкової (газодинамічної) ділянки струмини [45]:

$$\bar{S} = \frac{n}{1,2 + 0,3 \cdot n} + 4 \cdot (1,05 \cdot \sqrt{n} - 0,1) \quad (2.23)$$

При натіканні струмини на перешкоду, в якості якої виступає днище тупикового каналу, струмина повітря розгортається і прямує вздовж поверхні перешкоди.

Для визначення режиму течії напівобмеженої струмини вздовж днища тупикового каналу необхідно розрахувати протяжність областей течії з наступних виразів при  $\bar{h} < 6,2$  [46]:

- протяжність області пришвидженої течії:

$$x_* = 0,34 \cdot \bar{h}^{-0,7} \cdot d_0 \quad (2.24)$$

- протяжність області перехідної течії:

$$x_* < x_1 < 2 \cdot x_* \quad (2.25)$$

- протяжність області автомодельної течії:

$$x > 2 \cdot x_* \quad (2.26)$$

Максимальна швидкість повітря на зовнішній границі пристінного пограничного шару при  $\bar{h} > 6,2$  визначається за формулою [46]:

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$u_* = 3,68 \cdot \bar{h}^{-0,84} \cdot u_0 \quad (2.27)$$

Швидкість на зовнішній границі пристінного пограничного шару вздовж днища тупикового каналу при  $\bar{h} > 6,2$  визначається за формулами

- для області прискореної течії [41]:

$$u_m = u_* \cdot \left[ 1,5 \cdot \left( \frac{x}{x_*} \right) - 0,5 \cdot \left( \frac{x}{x_*} \right)^3 \right] \quad (2.28)$$

- для області перехідної течії [41]:

$$u_m = \left( \frac{24,1}{\bar{h}^{1,47}} \cdot x \cdot e^{-\frac{x}{x_*}} \right) \cdot u_0 \quad (2.29)$$

- для автомодельної області течії [47]:

$$u_m = \frac{1,32}{x} \cdot u_0 \quad (2.30)$$

Надлишковий статичний тиск вздовж днища тупикового каналу визначається з виразу [46]:

$$P_{\text{ст надл}} = \frac{\rho_{\text{атм}} \cdot u_n^2}{2} \cdot e^{-(c \cdot \bar{x})^2} \quad (2.31)$$

де  $c$  - коефіцієнт в рівнянні,

$\rho_{\text{атм}}$  - густина повітря при атмосферному тиску,  $\text{кг/м}^3$ .

Коефіцієнт  $c$  в формулі (2.31) при  $\bar{h} > 6,2$  дорівнює [46]:

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$c = 5,04 \cdot \bar{h}^{-0,75} \quad (2.32)$$

Динамічний тиск повітря вздовж перешкоди:

$$P_{\text{дин}} = \frac{\rho \cdot u_m^2}{2} \quad (2.33)$$

де  $\rho$  - поточна густина повітря, яка визначається за статичним тиском повітря, кг/м<sup>3</sup>.

Тиск гальмування повітря вздовж днища тупикового каналу:

$$P_{\text{надл}} = P_{\text{ст. надл.}} + P_{\text{дин}} \quad (2.34)$$

На рисунку 2.10 представлено порівняння експериментальних та розрахункових даних, яке свідчить про те, що розроблена математична модель відповідає процесу взаємодії повітряної струмини з перешкодою у вигляді поверхні неперервнолитого зливка.

Похибка розрахунку не перевищує 20 %, що для такого типу задач є цілком прийнятним.

Таким чином, за допомогою формули (2.33) можна визначити швидкість повітря на поверхні зливка, а по формулі [48] можна розрахувати коефіцієнт тепловіддачі від поверхні зливка до струмини охолоджуючого повітря при трансзвукових швидкостях її течії:

$$\bar{Nu} = 0,216 \cdot Re_0^{0,685} \cdot \left(\frac{h}{d_0}\right)^{-0,12} \cdot \left(\frac{x}{d_0}\right)^{-0,85} \quad (2.35)$$

де  $Re_0$  - критерій Рейнольдса, за параметрами газової струмини на зрізі

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сопла.

$$Re_0 = \frac{u_0 \cdot d_0}{\nu}, \quad (2.36)$$

де  $\nu$  - кінематичний коефіцієнт в'язкості повітря,  $m^2/s$ .

При діаметрі вихідного отвору сопла в діапазоні  $d_0=0,012...0,027$  м та абсолютному тиску повітря перед соплом  $P_c=0.2...4.8$  МПа мінімальні значення коефіцієнта тепловіддачі знаходяться в межах  $\alpha \approx 150...230$  Вт/ $m^2 \cdot K$ .

Перспективою даної роботи вбачається розробка оптимальних режимів експлуатації системи повітряного охолодження зливка в ЗВО та розробка технічних рішень її впровадження.

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## РОЗДІЛ 3

### ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВЗАЄМОДІЇ ГАЗОВОЇ СТРУМИНИ З ПЕРЕШКОДОЮ

#### 3.1 Послідовність проведення експериментальних досліджень

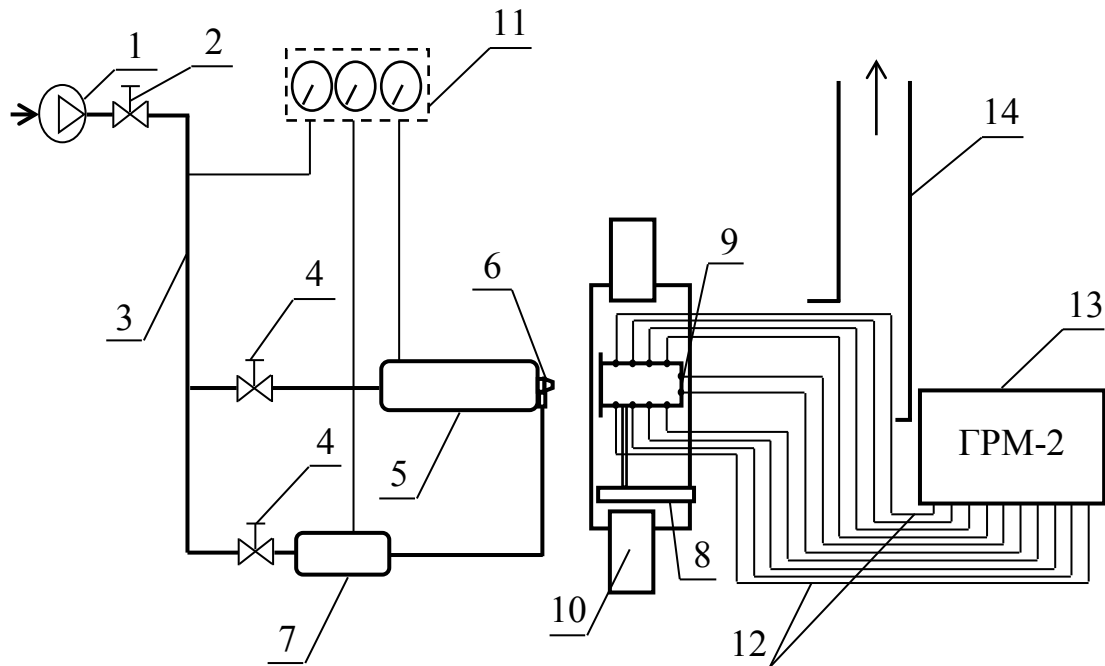


Рисунок 3.1- Принципова схема експериментальної установки для моделювання процесу взаємодії газової струмینی з перешкодою

- 1- компресор
- 2- запірна засувка
- 3- повітропровід високого тиску
- 4- регулююча засувка
- 5- форкамера центрального потоку
- 6- сопло
- 7- форкамера кільцевого потоку
- 8- координатник
- 9- модель тупикового каналу
- 10- тіньовий прилад
- 11- щит зразкових манометрів
- 12- пакет імпульсних ліній
- 13- груповий реєструючий манометр (ГРМ-2)
- 14- повітровідвід

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Принципова схема експериментальної установки для дослідження процесу натікання газової струмини на тупиковий канал представлена на рисунку 3.1.

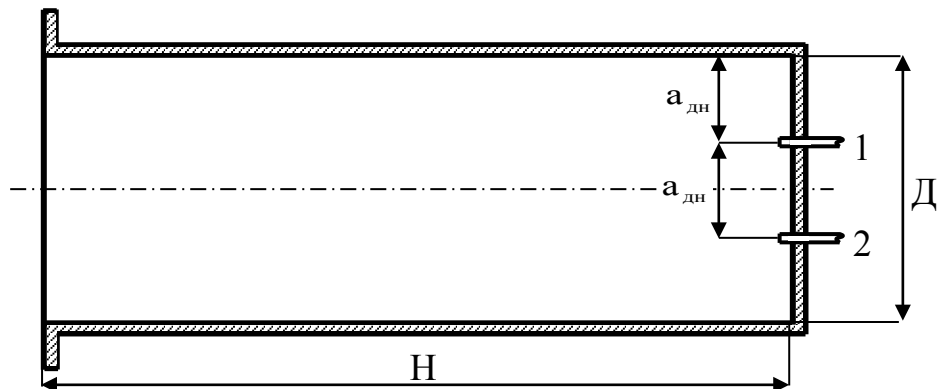


Рисунок 3.2- Схема розташування дренажних отворів в тупиковому каналі

1...10- дренажні отвори імпульсних ліній

$a_{бок}$  - крок дренажних отворів вздовж бічних стінок тупикового каналу

$a_{дн}$  - крок дренажних отворів вздовж днища тупикового каналу

H- глибина тупикового каналу

D- діаметр тупикового каналу

Стиснене повітря від компресора типу ВУ-0,6/13М1 [3] при експерименті з одним соплом через запірну та регулюючу засувки, а також форкамеру центрального потоку надходить безпосередньо до сопла. Кільцевий канал і форкамера кільцевого потоку в експериментальній установці призначені для можливості розміщення декількох сопел перед моделлю. Модель, що імітує поверхню зливка та рядне розташування сопел, виконана у вигляді тупикового каналу (дивись рисунок 3.2) і розміщена на координатнику, що дозволяє змінювати кут натікання струмини на тупиковий канал.

Для фіксації тиску в повітропроводі високого тиску та у форкамерах центрального і кільцевого потоків застосовувалися деформаційні зразкові манометри з умовною шкалою типу МО, модель 1227. Верхня межа вимірів зразкових манометрів становить 1,6 МПа. Клас точності приладів 0,15. Шкала

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

приладу містить 400 умовних одиниць, ціна розподілу шкали приладу - одна умовна одиниця [4].

Засувки, що дозволяють змінювати тиск у форкамерах, та електропривід керування координатником виведені на пульт керування експериментальною установкою.

Суть експерименту полягала у вимірі тиску на днище тупикового каналу при натіканні на нього газового струменя. Для цього в тупиковому каналі виконані дренажні отвори, які з'єднані через імпульсні трубки із груповим манометром ГРМ-2.

Дренажні отвори діаметром 0,8 мм [5] виконані по нормалі до осі тупикового каналу. У дренажні отвори встановлювалися мідні трубки повного тиску. Кромки трубок виведені над внутрішньою поверхнею каналу на 0,3 мм і звернені до потоку, що натікає, для можливості вимірювання повного тиску потоку газу, що втікає в канал [6]. При швидкостях течії потоку  $M < 2,3$  погрішність виміру повного тиску мідною трубкою не перевищує 1 % [7].

Встановлення трубок у тупиковому каналі, що виступають у потік на 0,3 мм, здійснювалася з метою вимірювання максимуму повного тиску газової струмини на внутрішню поверхню тупикового каналу в зоні удару та розвороту струмини на перешкоді. Максимум повного тиску газу на внутрішню поверхню тупикового каналу реалізується на зовнішній границі пристінного прикордонного шару імпаکتної струмини.

Пакет гумових імпульсних трубок (ліній) діаметром 2 мм [7] від дренажних отворів тупикового каналу підведений до групового манометра ГРМ-2, що містить 20 важільних сильфонних манометрів (для даного експерименту використовувалися 2 важільних манометра). Величина тиску визначалася за кутом повороту мікрометричних гвинтів, кожний з яких з'єднаний із цифровим друкуючим лічильником показань манометрів у задані моменти часу. Для візуальних спостережень використовувались вертикальні шкали на передній стінці манометрів, уздовж яких переміщаються стрілки.

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Гранична похибка вимірювання манометра ГРМ-2 становить 0,5 % від максимального тиску, що вимірюється [7]. Показання цифрового друкуючого лічильника фіксувалися з урахуванням часу демпфування хвильових процесів в імпульсних трубках.

Оцінка точності виміру надлишкового тиску, а також розрахунок часу демпфування хвильових процесів в імпульсних трубках проводилися відповідно до відомих методик [8...11] і наведені в додатку А. Теплофізичні та механічні властивості середовищ та матеріалів знаходяться з робіт [12,13].

Експеримент по натіканню струмини на тупиковий канал охоплював наступні значення:

- діаметр вихідного отвору сопла ( $d_0$ ) – 0,012, 0,016, 0,020, 0,022, 0,024 та 0,027 м;

- довжина сопла ( $L_{\text{соп}}$ ) – 0,012, 0,016, 0,020, 0,022, 0,024 та 0,027 м;

- діаметр тупикового каналу ( $D$ ) – 0,04, 0,05, 0,06 и 0,08 м;

- глибина тупикового каналу ( $H$ ) – 0,12, 0,15, 0,18 та 0,24 м відповідно, отже,  $H = 3 \cdot D$ ;

- крок дренажних отворів вздовж днища тупикового каналу ( $a_{\text{дн}}$ ) – 0,0133, 0,0166, 0,02 та 0,0266 м відповідно;

- відносна відстань від зрізу сопла до осі тупикового каналу ( $\bar{h}=h/d_0$ ) – 0...28;

- відносний діаметр тупикового каналу  $\bar{d}=d_0/D$  – 0...28;

- взаємне розташування сопла та тупикового каналу співвісне (фронтальне натікання струмини), тобто кут  $\varphi$  між віссю сопла та віссю каналу  $0^\circ$ , і похиле (кут  $\varphi$  –  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  та  $60^\circ$ );

- абсолютний тиск газу перед соплом у форкамері центрального потоку ( $P_c$ ) – 0,2...4,8 МПа;

- число Маха на зрізі сопла ( $M_0$ ) – 1,0...2,0.

Фізична картина взаємодії газової струмини з тупиковим каналом

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

приведена на рисунку 3.3.

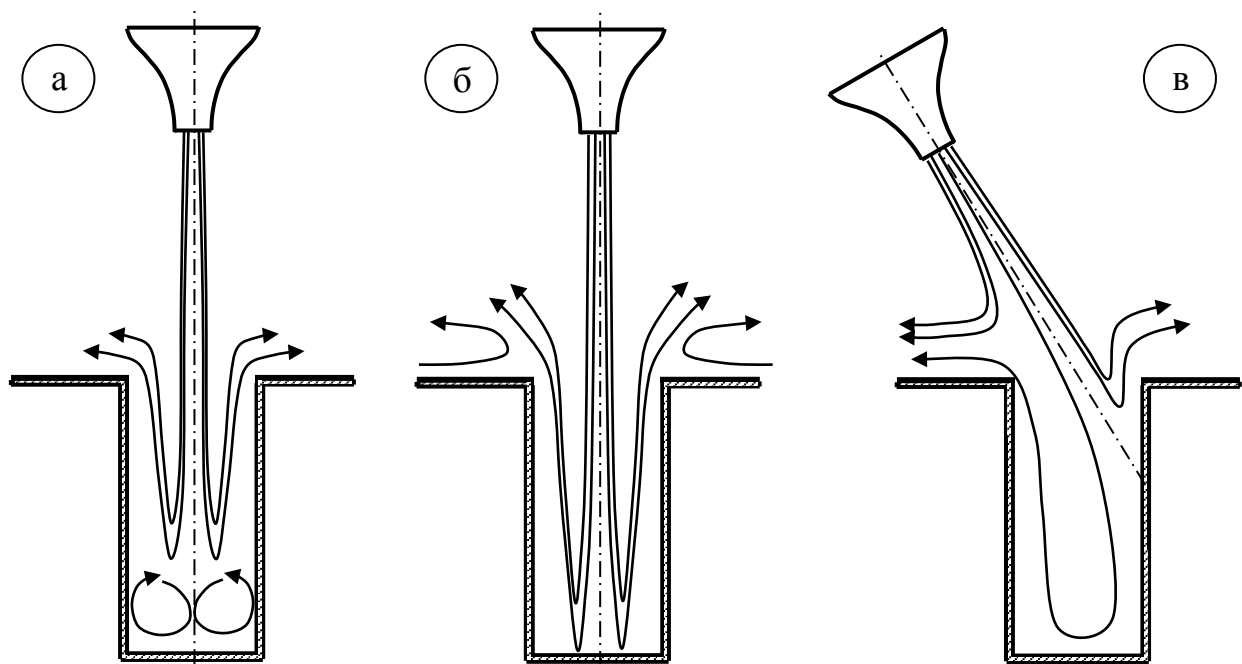


Рисунок 3.3- Схеми взаємодії імпульсної газової струмини з тупиковим каналом

а, б- фронтальне натікання струмини на тупиковий канал

в- бокове натікання струмини на тупиковий канал

При фронтальному натіканні струмини на тупиковий канал існують два варіанти взаємодії. У першому випадку (дивись рисунок 3.3а) струмина повністю втікає в тупиковий канал. Витіснення газу із каналу відбувається уздовж його бокової поверхні. При цьому на площині уздовж зрізу тупикового каналу утворюється ежекційна віяльна течія, вектор швидкості в якому направлений в сторону каналу. Інтенсивність цієї течії залежить від ежекційної здатності витікаючого із каналу потоку газу.

У другому випадку (дивись рисунок 3.3б) периферійна частина підійшовшої до каналу струмини не втікає в нього, а розтікається уздовж площини. При цьому всередині каналу утворюється вихрова течія.

При натіканні струмини на тупиковий канал, як показали спостереження при проведенні експериментів, взаємодія струмини з тупиковим каналом має комбінований характер. В ближній до площини частині струмини, тобто в області гілки з меншою витратою газу, реалізується

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



зрізу сопла до площини вхідного отвору каналу  $\bar{h}_{кр} = 0,30$  натікання струмини на площину перешкоди. В дальній частині струмини, тобто в області гілки з великою витратою газу реалізується схема течії з максимальним проникненням потоку газу в порожнину тупикового каналу.

### 3.2 Дослідження динамічних характеристик імпаکتної газової струмини

Для визначення умов досягнення у сталевипускному отворі конвертера потрібного тиску газової струмини проведена серія експериментів по визначенню динамічних характеристик газової струмини. На рисунках (дивись рисунки 3.4, 3.5, 3.6) приведені результати експериментальних досліджень у вигляді залежності надлишкового тиску на днище тупикового каналу ( $\bar{P}_{д\ напл} = \frac{P_{д\ надл}}{P_{атм}}$ ) від тиску газу перед соплом ( $\bar{P}_c$ ).

Лінійна залежність тиску газу на днище каналу від тиску газу перед соплом свідчать про те, що уздовж днища каналу реалізується автотельна вихрова зона течії, швидкість газу в якій зберігається постійною, а зміна тиску поблизу днища каналу відбувається за рахунок зміни щільності газового потоку.

Порушення пропорційності при збільшенні тиску газу перед соплом та параметрі  $\bar{d} \leq 0,3$  пояснюється переходом до іншого режиму взаємодії струмини з тупиковим каналом: від режиму повного втікання струмини в канал до режиму натікання, коли частина потоку розтікається уздовж поверхні, не потрапляючи до каналу. Слід відмітити, що збільшення розкиду замірів для  $\bar{h}_{кр} = 0$  та  $\bar{h}_{кр} = 0,3$  викликано виникненням сильних хвильових процесів у каналі.

Разом з цим в діапазоні відносної відстані від зрізу сопла до зрізу тупикового каналу  $1 < \bar{h}_{кр} < 3$  в основному реалізується режим втікання струмини в канал, тому вплив відстані на величину тиску на днище тупикового каналу порівняно невеликий.

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При зменшенні відстані між зрізом сопла та зрізом тупикового каналу ( $\bar{h}_{кр} \approx 0$ ), тиск на днище каналу збільшується, так як проявляється вплив зтіснення для газової струмини, яка втікає в тупиковий канал внаслідок зворотного потоку газу, який витісняється з каналу.

Представляє інтерес вивчення працездатності газового затвору при застосуванні надзвукових сопел.

Як слідує з принципу дії газового затвору, в початковий період руху затвору взаємодія газової струмини відбувається не з льоткою, а зі струминою шлакометалічного розплаву. У зв'язку з цим дія на потік розплаву струмини буде більше відповідати вільній струмині, а не імпактній. По мірі наближення сопла до сталевипускного отвору льотки тиск в струмині буде зростати, наближаючись до даних, що відповідають імпактній течії.

Ця обставина, а також вплив значення числа Маха на запірні властивості газової струмини потребує додаткових досліджень. Додаткових досліджень потребує також оцінка запірних властивостей газової струмини при боковому натіканні струмини на тупиковий канал.

Результати експериментальних досліджень розподілу тиску  $\bar{P}_d$  уздовж днища тупикового каналу при боковому натіканні струмини представлені на рисунку (дивись рисунок 3.7) у вигляді залежності величини тиску уздовж днища каналу від відносної відстані між зрізом звукового сопла ( $M_0 = 1$ ) та зрізом тупикового каналу при відносному діаметрі  $\bar{d} = 0,4$ . В замірах окрім кута нахилу сопла був також тиск газу перед соплом  $P_c$ .

Абсолютний тиск газу уздовж днища тупикового каналу визначається наступним чином:

$$\bar{P}_d = \frac{P_{d \text{ надл}} + P_{\text{атм}}}{P_{\text{атм}}}, \quad (3.1)$$

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Дані, представлені (дивись рисунок 3.7) вказують на аналогічність у зміні тиску газу на днище каналу при фронтальному та боковому натіканні струмینی. При збільшенні відстані від зрізу сопла до площини зрізу тупикового каналу тиск на днище каналу зменшується, а при збільшенні тиску газу перед соплом при інших однакових умовах – збільшується.

Результати експериментального дослідження тиску газу на внутрішню поверхню тупикового каналу при боковому натіканні струмینی представлено на рисунках (дивись рисунок 3.8...3.13). Модель, імітуючи льотку конвертера, виконана у вигляді тупикового каналу (дивись рисунок 3.2).

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

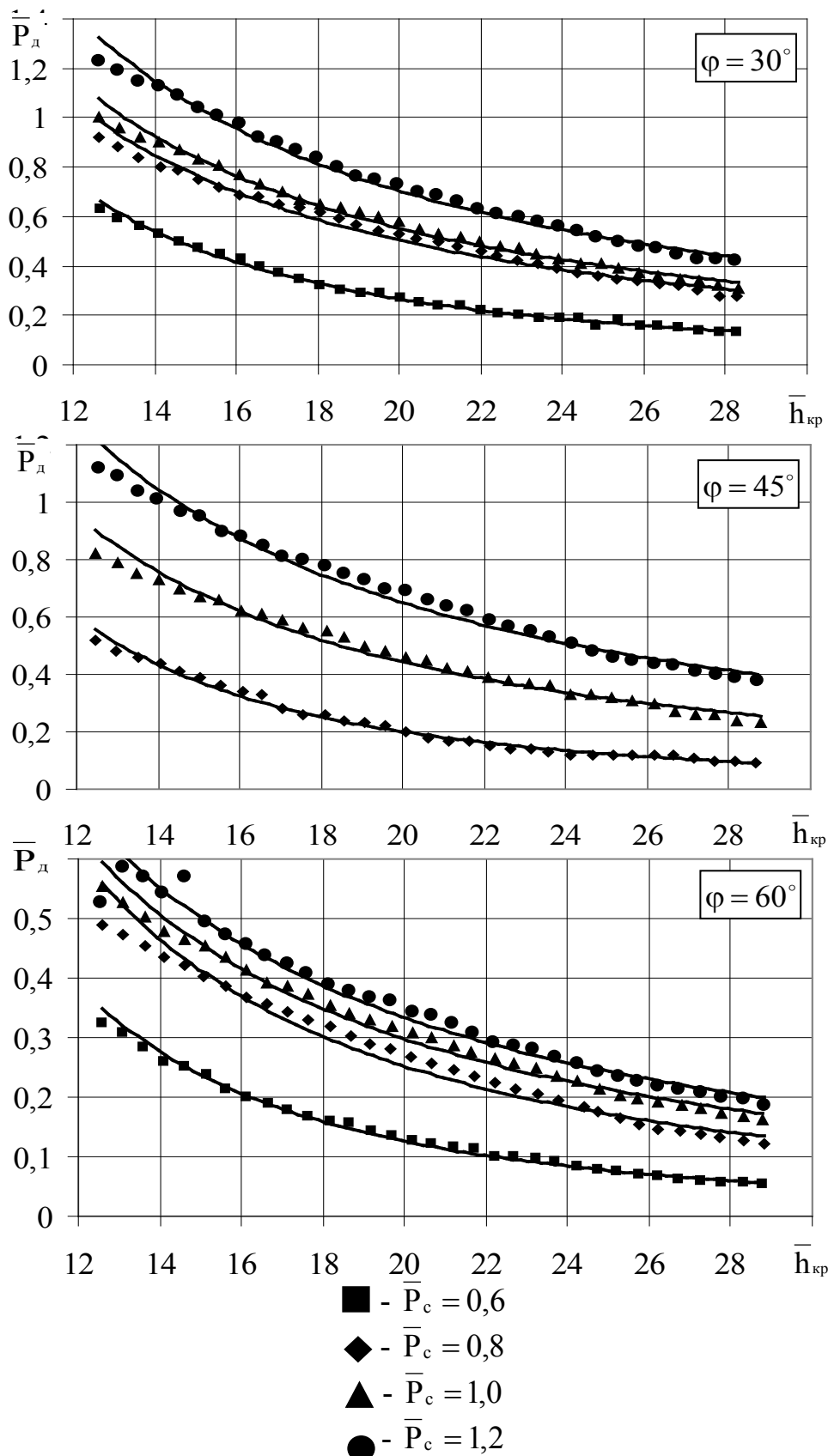
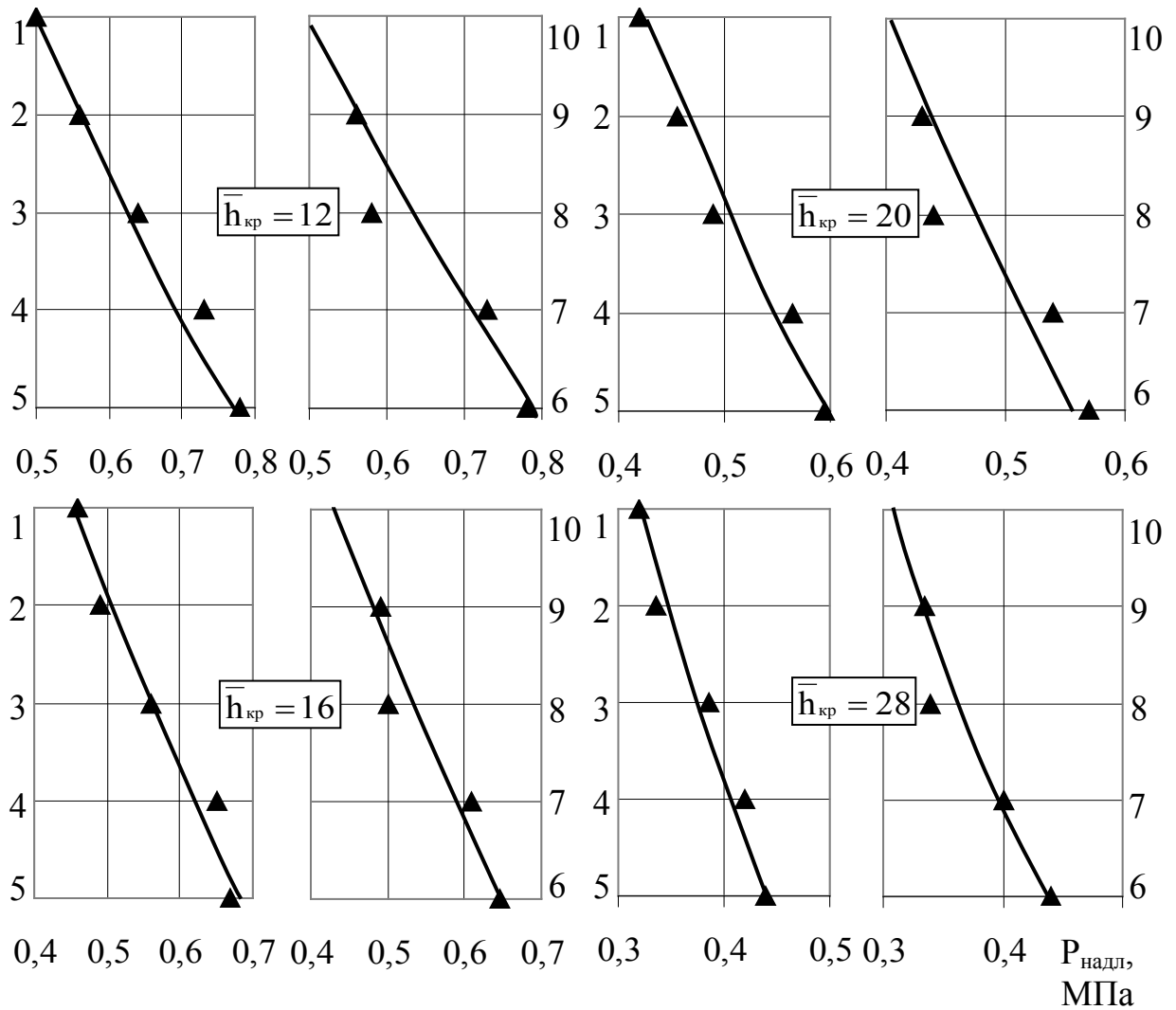


Рисунок 3.7- Залежність тиску на днище тупикового каналу ( $\bar{P}_d$ ) від відносної відстані між зрізом сопла та зрізом тупикового каналу ( $\bar{h}_{кр}$ ) при відносному діаметрі тупикового каналу  $\bar{d} = 0,4$

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

025.150048.MP.2020.001

Арк.



▲ - експериментальні дані

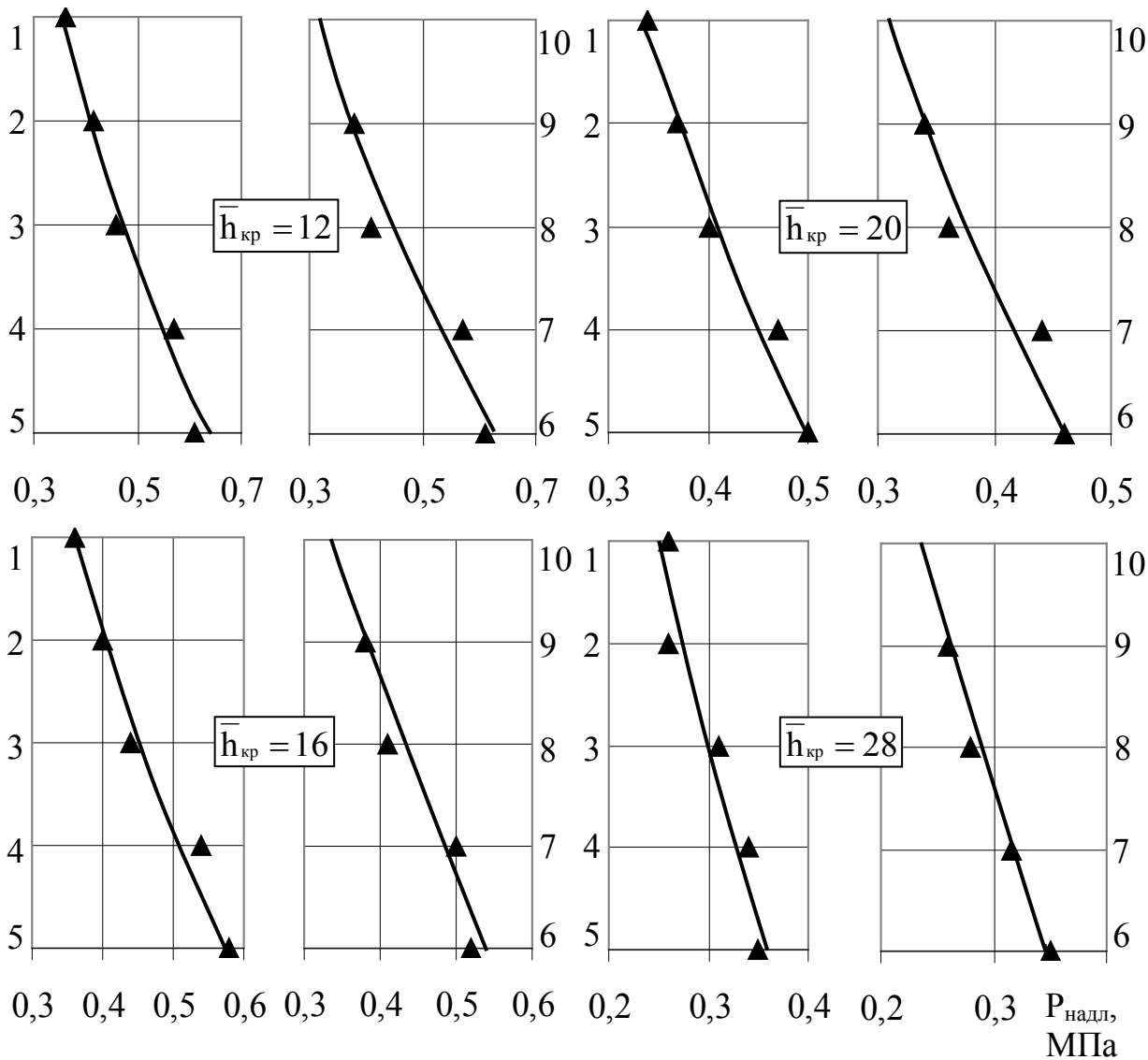
1...5 і 6...10 на вісі ординат графіків-точки виміру тиску

Рисунок 3.8- Порівняння тисків газової струмینی на внутрішню поверхню тупикового каналу при тиску перед соплом  $P_c = 1,9$  МПа та натіканні струмینی під кутом ( $\varphi = 45^\circ$ )

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

025.150048.МР.2020.001

Арк.



▲ - експериментальні дані

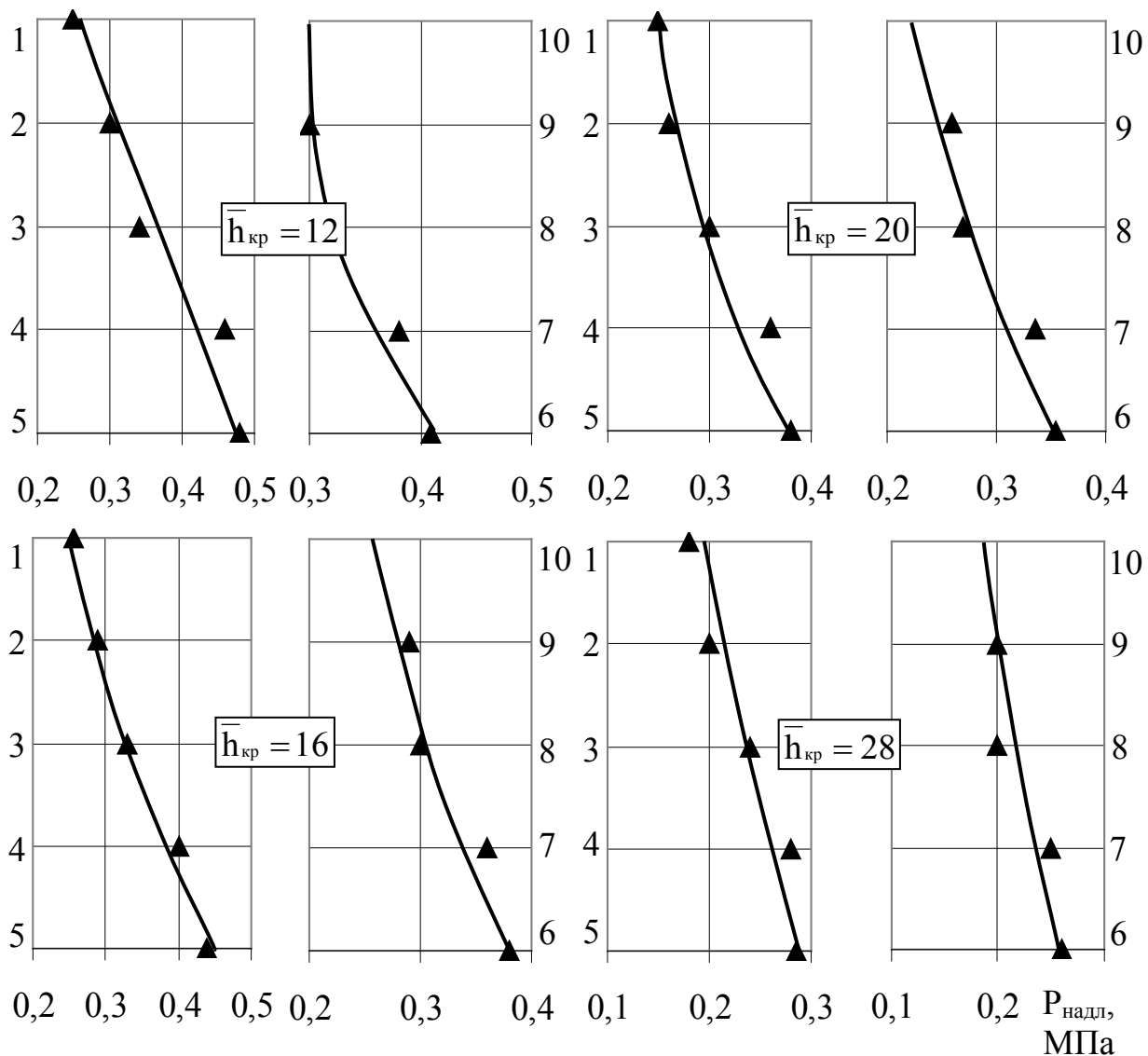
1...5 і 6...10 на вісі ординат графіків-точки виміру тиску

Рисунок 3.9- Порівняння тисків газової струмини на внутрішню поверхню тупикового каналу при тиску перед соплом  $P_c = 1,5$  МПа та натіканні струмини під кутом ( $\varphi = 45^\circ$ )

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

025.150048.MP.2020.001

Арк.



▲ - експериментальні дані

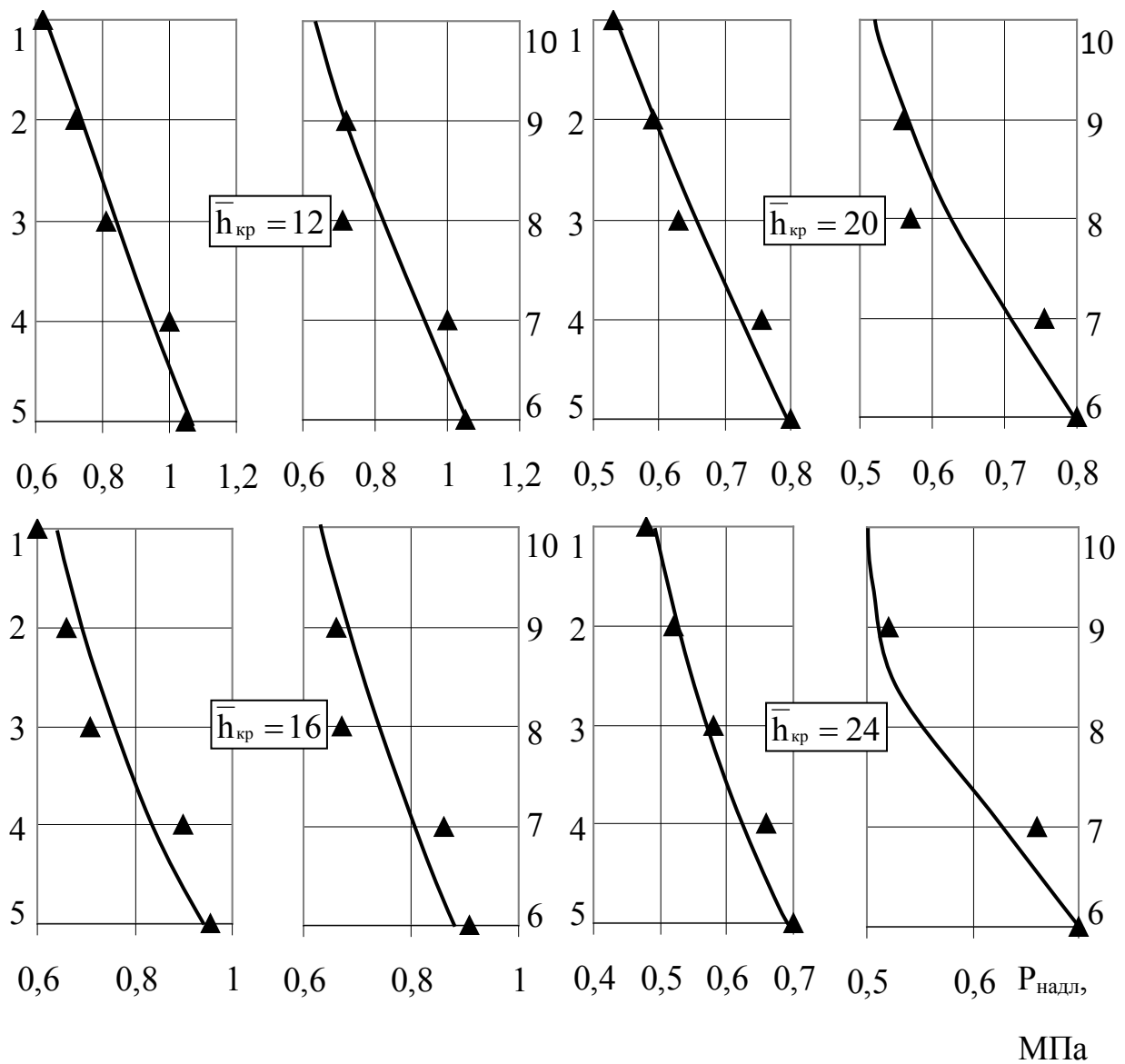
1...5 і 6...10 на вісі ординат графіків-точки виміру тиску

Рисунок 3.10- Порівняння тисків газової струмини на внутрішню поверхню тупикового каналу при тиску перед соплом  $P_c = 1,1 \text{ МПа}$  та натіканні струмини під кутом ( $\varphi = 45^\circ$ )

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

025.150048.МР.2020.001

Арк.



▲ - експериментальні дані

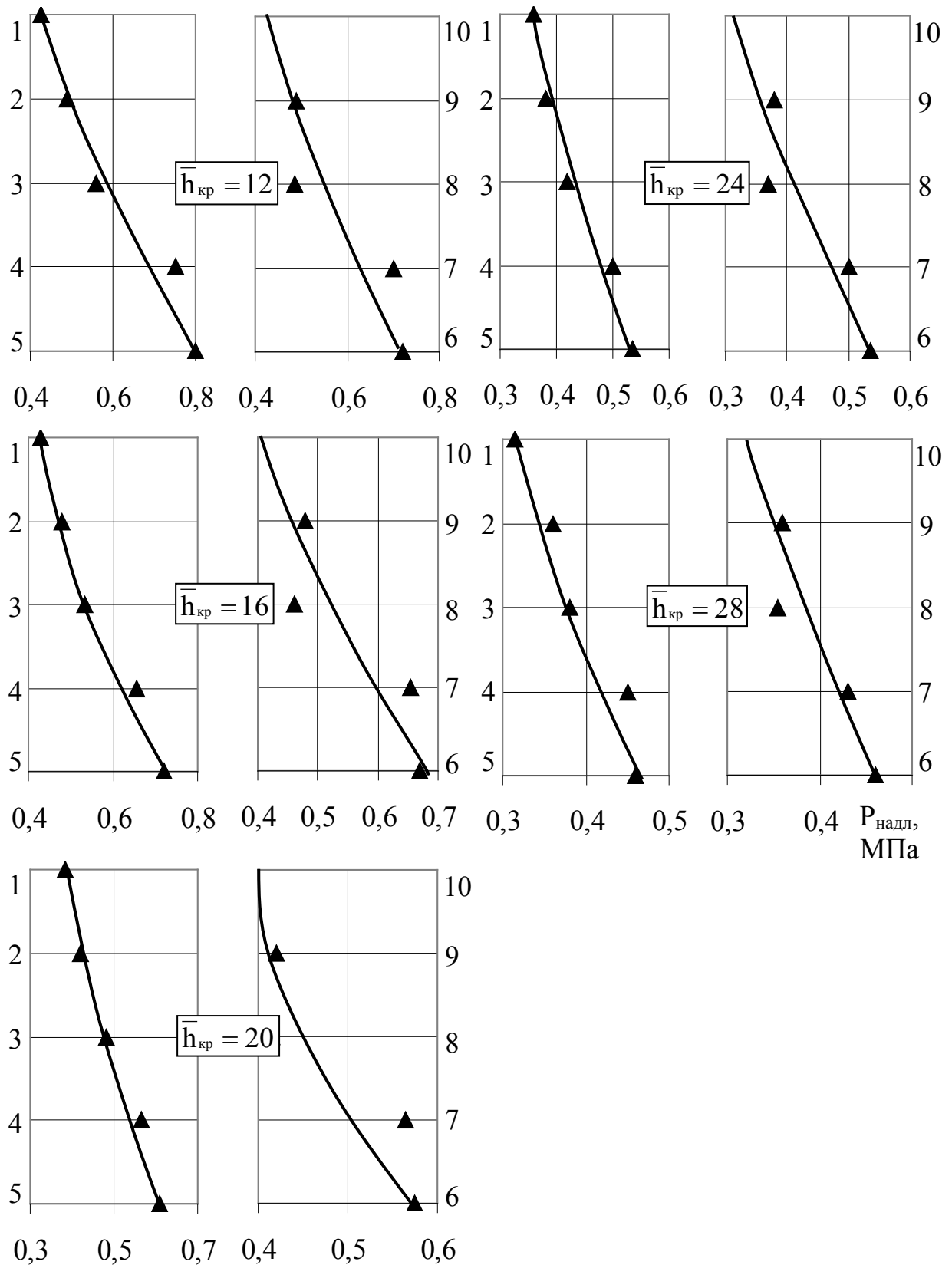
1...5 і 6...10 на вісі ординат графіків-точки виміру тиску

Рисунок 3.11- Порівняння тисків газової струмини на внутрішню поверхню тупикового каналу при тиску перед соплом  $\bar{h}_{кр} = 16$  МПа та натіканні струмини під кутом ( $\bar{h}_{кр} = 24$ )

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

025.150048.МР.2020.001

Арк.

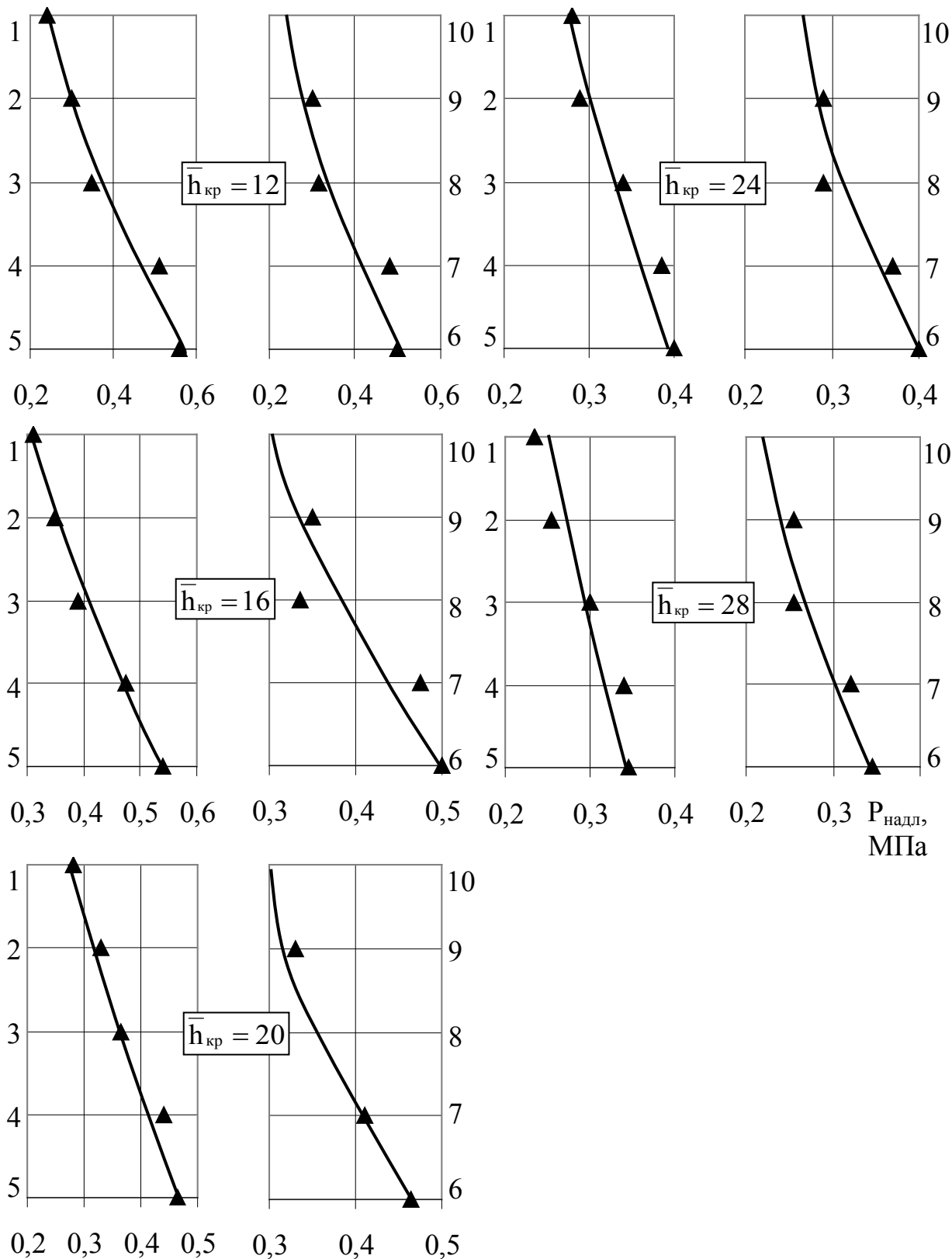


▲ - експериментальні дані

1...5 і 6...10 на вісі ординат графіків-точки виміру тиску

Рисунок 3.12- Порівняння тисків газової струмини на внутрішню поверхню тупикового каналу при тиску перед соплом  $P_c = 1,7$  МПа та натіканні струмини під кутом ( $\varphi = 30^\circ$ )

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



▲ - експериментальні дані

1...5 і 6...10 на вісі ординат графіків-точки виміру тиску

Рисунок 3.13- Порівняння тисків газової струмини на внутрішню поверхню тупикового каналу при тиску перед соплом  $P_c = 1,1$  МПа та натіканні струмини під кутом ( $\varphi = 30^\circ$ )

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

025.150048.МР.2020.001

Арк.

## ВИСНОВКИ

1. На сучасних МНЛЗ застосовується водоповітряне охолодження зливка основними недоліками якого є:

- необхідність очищення великих об'ємів води ( в середньому, близько 5 л/хв на одну форсунку) перед форсункою для запобігання її засмічення;
- формування міжкристалічних тріщин внаслідок різної щільності розподілу охолоджувальної води на поверхні зливка, що погіршує його якість тощо.

2. З літературних джерел відомо про лабораторні дослідження систем охолодження поверхні неперервнолитого зливка виключно струминами повітря. Такі системи охолодження не набули промислового впровадження через низький коефіцієнт тепловіддачі ( $\alpha=100\dots110$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), який для систем водоповітряного охолодження перевищує 140...175 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Низький коефіцієнт тепловіддачі в системах повітряного охолодження пояснюється малою швидкістю струмин повітря.

3. Застосування в якості охолоджувального середовища трансзвукових газових струмин спроможне забезпечити зіставні з водоповітряним охолодженням значення коефіцієнта тепловіддачі. Крім того, використання повітря в якості охолоджувального середовища усуває недоліки, притаманні системам водоповітряного охолодження.

4. Проведено експериментальне дослідження натікання трансзвукової газової струмини на тупиковий канал, який імітує поверхню зливка та підтримуючі ролики.

5. Порівняння тисків газової струмини на перешкоду у вигляді тупикового каналу дозволяє зробити висновок, що тиск на поверхню неперервнолитого зливка буде підвищуватися зі збільшенням тиску газу перед соплом та зменшенням відстані між зрізом сопла та поверхнею зливка.

6. Виконано обробку дослідних даних у вигляді критеріальних рівнянь для універсалізації використання експериментального матеріалу при

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

конструктивній розробці системи повітряного охолодження.

7. Запропонована математична модель взаємодії трансзвукової газової струмینی з поверхнею неперервнолитого зливка, яка дозволяє розрахунковим шляхом визначити тиск на поверхню зливка, а, одже, швидкість руху повітря вздовж поверхні зливка та коефіцієнт тепловіддачі від поверхні зливка до струмینی повітря.

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Компрессорные машины: каталог / [Центр научно-технической информации “Веполь”].- Сумы, 1993.- 98с.
2. Приборы и средства автоматизации: отраслевой каталог: в 2ч. / [Информприбор].- М., 1993.- 124с.  
Ч. 1 Устройства для контроля и регулирования технологических параметров / [Информприбор].- М., 1993.- 124с.  
Ч. 1.2-1.4 Приборы для измерения и регулирования давления, перепада давления и разрежения, расхода и количества жидкостей и газов, уровня жидкостей и сыпучих сред [Информприбор].- М., 1993.- 124с.
3. Аралов А.Д. Влияние вдува в корневую часть осесимметричной струи на структуру ее течения / А.Д. Аралов, Ж.П. Можаяева // Известия высших учебных заведений. Серия машиностроение.- 1976.- №3.- С. 75-79.
4. Повх И.Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении / И.Л. Повх.- Л.: Машиностроение, 1974.- 480с.
5. Горлин С.М. Аэромеханические измерения / С.М. Горлин, И.И. Слезингер.- М.: Наука, 1964.- 720с.
6. Браславский Д.А. Точность измерительных устройств / Д.А. Браславский, В.В. Петров.- М.: Машиностроение, 1976.- 278с.
7. Брянский Л.Н. Краткий справочник метролога: справочник / Л.Н. Брянский, А.С. Дойников.- М.: Издательство стандартов, 1991.- 79с.
8. Гонек Н.Ф. Манометры / Н.Ф. Гонек.- Л.: Машиностроение, 1979.- 176с.
9. Ратанов Г.С. Методы и средства измерений динамических давлений / Г.С. Ратанов.- Томь: Издательство Томского университета, 1986.- 108с.
10. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей: справочник / Н.Б. Варгафтик.- М.: Наука, 1972.- 720с.
11. Енохович А.С. Справочник по физике: справочник / А.С. Енохович.- М.: Просвещение, 1990.- 384с.
12. Огурцов А.П. Непрерывное литье стали [Текст] / А.П. Огурцов,

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

А.В. Гресс.- Днепропетровск: Системные технологии, 2002.- 675с.

13. Скворцов А.А. Теплопередача и затвердевание стали в установках непрерывной разливки [Текст] / А.А. Скворцов, А.Д. Акименко.- М.: Металлургия, 1966.- 191с.

14. Носоченко О.В. Моделирование процесса охлаждения непрерывнолитых слитков [Текст] / О.В. Носоченко, В.И. Лебедев, В.В. Емельянов // Сталь.- 1983.- №12.- С. 37.

15. Непрерывная разливка стали на радиальных установках [Текст] / [В.Т. Сладкошteeв, Р.В. Потанин, О.Н. Суладзе, В.С. Рутес].- М.: Металлургия, 1974.- 288с.

16. Development of Hard Secondary Cooling by High-pressure Water Spray in Continuous Casting / Ito Y., Murai T., Miki Y. [et al.] // ISIJ International.- 2011.- Vol. 51, № 9.- P. 1454-1460.

17. Лухтура Ф.И. Одномерная теория сверхзвуковых нерасчетных струй газа / Ф.И. Лухтура // Известия АН СССР. Серия Механика жидкости и газа.- 1993.- №1.- С. 48-56.

18. Юдаев Б.Н. Теплообмен при взаимодействии струй с преградами [Текст] / Б.Н. Юдаев, М.С. Михайлов, В.К. Савин. - М.: Машиностроение, 1977.- 248с.

19. Акимов Г.А. Особенности взаимодействия сверхзвуковой нерасчетной струи с преградой конечных размеров / Г.А. Акимов // Инженерно-физический журнал.- 1984.- Т. 46.- №3.- С. 375-380.

20. Соколов Е.И. Экспериментальное определение предельной нерасчетности сверхзвуковой струи, натекающей на нормально расположенную безграничную плоскую преграду / Е.И. Соколов, А.В. Старцев, В.Н. Усков // Инженерно-физический журнал.- 1977.- Т. 32.- №2.- С. 247-250.

21. Гинзбург И.П. Некоторые особенности взаимодействия сверхзвуковой недорасширенной струи с плоской преградой / И.П. Гинзбург,

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Б.Г. Семилетенко, В.С. Терпигорьев // Инженерно-физический журнал.- 1970.- Т. 19.- №3.- С. 412-417.

22. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика: в 2т. [Текст] / Г.Н. Абрамович.- М.: Машиностроение, 1991.-Т 1.- 532с.

23. Лухтура Ф.И. Одномерная теория сверхзвуковых нерасчетных струй газа / Ф.И. Лухтура // Известия АН СССР. Серия Механика жидкости и газа.- 1993.- №1.- С. 48-56.

24. Анцупов А.В. Исследование параметров нерасчетной сверхзвуковой струи газа / А.В. Анцупов // Журнал технической физики.- 1974.- Т. 44.- №2.- С. 372-379.

25. Юдаев Б.Н. Теплообмен при взаимодействии струй с преградами [Текст] / Б.Н. Юдаев, М.С. Михайлов, В.К. Савин. - М.: Машиностроение, 1977.- 248с.

26. Сычев А.Г. Результаты исследования затопленной турбулентной струи, набегающей перпендикулярно на плоскость гладкого потолка / А.Г. Сычев // Инженерно-физический журнал.- 1964.- Т. 7.- №3.- С. 46-53.

27. Shoukri M. On the heat transfer characteristics of constrained air jets impinging on a flat surface / M. Shoukri, A. Calka // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1987. - Vol. 30, №1. - P. 203-205.

					025.150048.MP.2020.001	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

