

2. Айзенберг, Ю. Б. Справочная книга по светотехнике [Текст] / Ю. Б. Айзенберг. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Знак, 2006. – 972 с.
3. Сапрыка, А.В. Современные технологии в осветительных системах мегаполиса [Текст] / А. В. Сапрыка. - Харків, ХНУРЕ, 2010. -260 с.
4. Рубцов, В.П. Моделирование в технике [Текст] / В.П. Рубцов, М.Я. Погребиский - М.: МЭИ, 2008. - 101с.
5. Коган, Л.М. Полупроводниковые светодиоды: современное состояние [Текст] / Л.М. Коган - Светотехника, 2000. - №6. - С 11-15.
6. Щербаков, В.Н. Исследование надежности и диагностика светодиодов на основе гетероструктур всех основных цветов [Текст] / В.Н. Щербаков // В сб. трудов 20 МНТК «Информационные технологии и моделирование приборов и техпроцессов в целях обеспечения качества и надежности». М: МГУПИ. 2006. - Т. 3. - С. 65-74.

### Abstract

The article represents an estimation of the reliability of street lighting system. The modern system of street lighting is the most complex system, the reliability of which is determined by the ability of an object to perform specified functions, saving in the course of time the values of specified operational characteristics within limits that match the specified modes and conditions of use. The process of change of operating mode parameters in the system of street lighting is usually accidental. This is connected with the random nature of load changes and the corresponding random nature of changes of power quality. The reliable operation of lighting systems is of great importance in the common balance of power consumption, that is why the modeling of the reliability of operation of shedding devices is relevant. A model of the reliability of LED shedding devices was suggested, taking into account the schedule of cycling work of lighting devices and monthly temperature and the prospects for further improvement of the street lighting of the city.

**Keywords:** estimation, street lighting, reliability, lighting system, basic kit, power consumption, statistical serie

В роботі представлено результати експериментального дослідження процесу витікання перегрітої води через короткі циліндричні канали різної довжини. Отримано витратні характеристики каналів та визначено розмір крапель, що утворюються в результаті «вибухового скипання» води на виході сопла

**Ключові слова:** адиабатно скипаючі потоки, розпилення, діаметр краплі

В работе представлены результаты экспериментального исследования процесса истечения перегретой воды через короткие цилиндрические каналы разной длины. Получены расходные характеристики каналов и определен размер капель, которые образуются в результате «взрывного вскипания» на выходе сопла

**Ключевые слова:** адиабатно вскипающие потоки, распыление, диаметр капли

УДК 66.069.832:536.423.18

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПИЛЕННЯ ПЕРЕГРІТОЇ ВОДИ

**А. С. Соломаха**

Молодший науковий співробітник  
Кафедра теоретичної та промислової теплотехніки  
Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут"  
пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056  
Контактний тел.: 093-763-28-47  
E-mail: as\_solomaha@ukr.net

### 1. Вступ

Фазовому переходу рідина-пара майже завжди передують метастабільний стан. У випадку глибокого заходу в область метастабільного стану подальший фазовий перехід супроводжується значним виділенням енергії, що, крім всього іншого, можна використовувати для інтенсифікації розпилення рідини [1-3]. В таких си-

стемах рідина перед подачею на форсунку попередньо перегрівається відносно температури, що відповідає точці кипіння в газовому середовищі на виході з форсунки.

Практичний інтерес представляють перегріву в інтервалі температур води  $T_g = 110...220^{\circ}\text{C}$ , що викликає широке поширення вторинних енергоресурсів із вказаною температурою, які можна використовувати

для попереднього перегріву рідини без додаткових затрат енергії.

В той же час, швидкоплинний процес пароутворення після виходу перегрітої рідини з форсунки має доволі специфічні та маловивчені особливості, що зумовило необхідність більш детального дослідження пароводяного факелу перегрітої води.

Найбільш просто реалізувати витікання перегрітої води можна через короткий циліндричний канал. Незважаючи на інтенсивне дослідження адіабатно скипаючих потоків [4-7] в літературі практично відсутні дані щодо розміру крапель, які утворюються на виході з сопла після «вибухового скипання».

## 2. Мета та завдання дослідження

Основним завданням дослідження було отримання даних по дисперсному складу крапель, що утворюються в результаті витікання перегрітої води через короткий циліндричний канал, визначення впливу перегріву на характеристики спектру крапель та витратні характеристики сопла, вивчення форми та розміру факелу.

## 3. Опис установки та методики проведення експерименту

Для вивчення особливостей витікання перегрітої води було зібрано експериментальний стенд, принципова схема якого зображена на рис. 1.

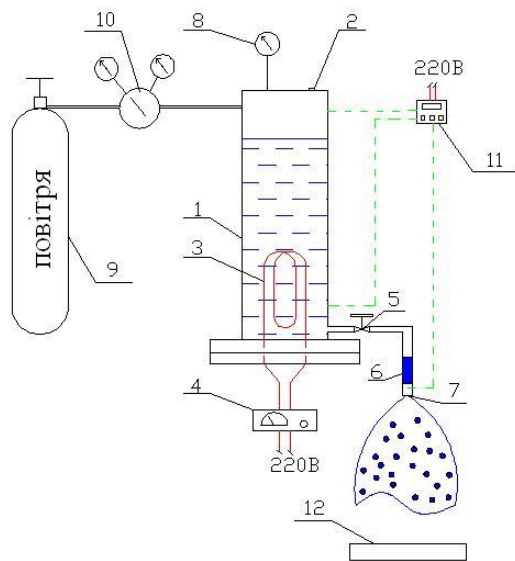


Рис. 1. Принципова схема експериментальної установки

Дослідження проводилися наступним чином: теплоізолюваний котел 1 ( $V = 8\text{л}$ ) через заливний отвір 2 заповнювався дистильованою водою (очистка методом зворотного осмосу), яка нагрівалася ТЕНОм 3 до температури насичення та кипіла при атмосферному тиску близько 10 хвилин. Вважалося, що в результаті з води повністю видалялися розчинені в ній гази. Після цього заливний отвір 2 герметизувався і нагрів води продовжувався. Очевидно, що нагрів води в замкнено-

му просторі супроводжувався зростанням тиску. Після досягнення необхідної температури відбувалося зменшення потужності ТЕНа 3 за допомогою регулятора потужності 4 до рівня, що забезпечував компенсацію теплових втрат котла в навколишнє середовище. Про вихід на робочий режим свідчила стабільність показань датчиків температури, що встановлені в верхній та нижній частині котла. Після цього відкривався вентиль 5 та під дією тиску власної насиченої пари відбувалося витікання води через короткий циліндричний канал 7. Прозора ділянка 6 слугувала для візуального контролю за станом рідини безпосередньо перед циліндричним каналом. Заміри та фотографування розпочиналися після стабілізації показань датчика температури перед соплом.

В окремих дослідах для створення необхідного тиску в котлі передбачалася подача стисненого повітря з балону 9 через редуктор-регулятор 10. Контроль тиску здійснювався за показаннями манометра 8.

Візуальна реєстрація процесу впорскування перегрітої води в потік повітря здійснювалася фотокамерою CANON Cybershot A540 з витримкою в діапазоні до 1/2000 секунди. В якості реєструвального вторинного пристрою для вимірювання температури використовувався восьмиканальний вимірювач температури 11 РегМик І8 з програмним забезпеченням SSD\_v3.5.

Якість розпилення визначалася в результаті уловлення крапель на імерсійне середовище (кедрове масло) за допомогою спеціально розробленого пристрою 12 із затвором для відсікання крапель. Предметне скло з уловленими краплями встановлювалося під мікроскоп «Биолом Р – 11» з мірною сіткою, після чого відбувалося мікрофотографування та підрахунок розміру крапель.

## 4. Вплив початкової температури перегрітої води на форму факела та витратні характеристики

Температура та тиск води в котлі в більшості дослідів відповідали лінії насичення. Досліджувалося розпилення води через короткі циліндричні канали діаметром  $d = 0,5\text{мм}$  та різною довжиною  $L$ , мм (рис.2).

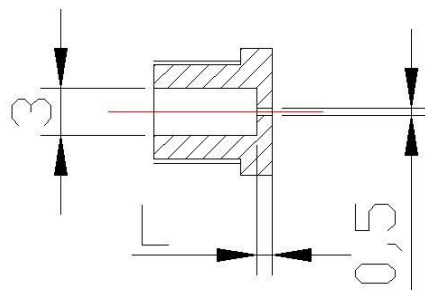


Рис. 2. Короткий циліндричний канал

Основним робочим каналом слугувало сопло з відношенням  $L/d = 2$  ( $L = 1\text{мм}$ ). В такому каналі зберігається висока степінь метастабільності потоку, а скипання рідини відбувається в основному на виході з сопла і супроводжується активним пароутворенням.

При температурах води до 150 °С спостерігається крупномасштабний розпад струменя на окремі частини, що рухаються один за одним в осьовому напрямку (рис. 3). При таких малих перегрівах щільність центрів пароутворення настільки мала, що на ділянці струменя довжиною одного діаметру приходиться менше одного зародку пари [6]. Поле початкових параметрів рідини, при яких відбувається розпад такого типу, приблизно співпадає з полем поверхневого розпаду струменя.



Рис. 3. Зовнішній вигляд струменя перегрітої води; T = 140 °С, L/d = 2

Заміри температури вісі струменя виявили високу незавершеність процесу пароутворення на виході з сопла: рідина виходить у вигляді метастабільного стану.

З точки зору розпилення діапазон температур до 140 °С сам по собі не представляє окремого інтересу. Проте, слабкі перегріві можуть бути використані для покращення існуючих варіантів розпилення, коли на існуючий ефект (закрутка струменя чи ін.) додатково накладається ефект скипання метастабільної рідини.

При початкових температурах води вище 150 °С стає помітним вплив фазових перетворень на форму струменя (рис.4). Факел розпилення приймає характерний конічний вигляд, при цьому кут розкриття залежить від початкової температури і монотонно зростає приблизно від α = 40° при 160 °С до α = 110° при 210 °С. Подальше зростання температури води до 230 °С не суттєво змінювало форму факела.

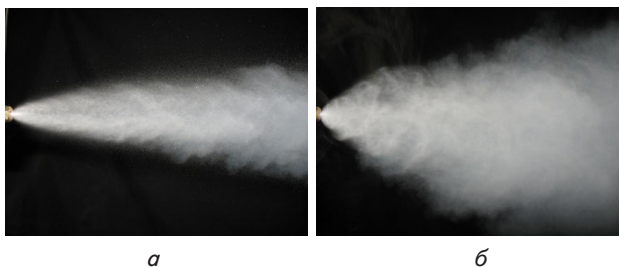


Рис. 4. Зовнішній вигляд струменя перегрітої води L/d = 2: а – T = 160 °С; б – T = 200 °С

Експериментальні дослідження витікання перегрітої води через канали з відношенням L/d < 3 показали, що в широкому інтервалі температур витрата води, що скипає, близька до результатів розрахунку по рівнянню Бернуллі, яке справедливе для нестисливої рідини:

$$G = f \cdot \mu \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta P \cdot \rho_l}$$

де G – масова витрата води, кг/с;  
 f – площа перерізу сопла, м<sup>2</sup>;  
 $\Delta p = p_f - p_0$  – перепад тиску в каналі, Па;  
 $\rho_l$  – щільність рідини при температурі дослідів, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\mu$  – гідравлічний коефіцієнт витрати, який визначається дослідним шляхом по витіканню холодної рідини.

На рис. 5 зображено витратні характеристики каналу L/d = 2 для холодної та перегрітої води з параметрами на лінії насичення в залежності від початкового тиску на вході в канал.

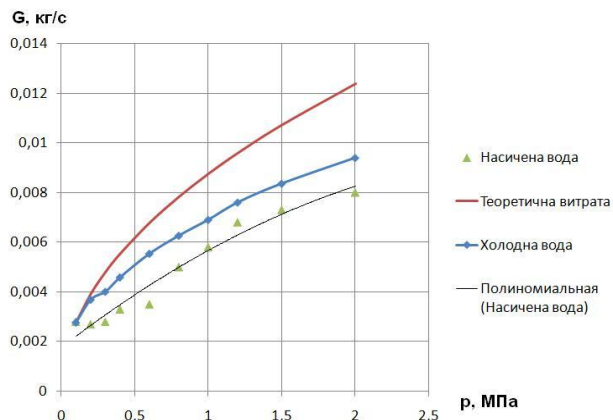


Рис. 5. Залежність витрати води від початкового тиску для каналу L/d = 2

Отримані дані свідчать про подібність кривих витікання холодної та гарячої води, проте відзначається падіння витрати перегрітої води в порівнянні з холодною, що при використанні формули Бернуллі можна врахувати за рахунок зменшення гідравлічного коефіцієнта витрати  $\mu$ . Зокрема, для постійного тиску 0,4 МПа коефіцієнт витрати поступово зменшується від  $\mu \approx 0,8$  для холодної води до  $\mu \approx 0,7$  для насиченої при даному тиску (рис. 6). Стабільний тиск в котлі в даній серії дослідів підтримувався за допомогою подачі повітря з балону через редуктор-регулятор.

Аналогічний комплекс досліджень було виконано для довших каналів. Зокрема при постійному діаметрі сопла d = 0,5 мм відношення L/d складало 4; 8 та 14.

Із зростанням довжини каналу спостерігається зменшення метастабільності на виході з сопла, що супроводжується зміною форми факела: він наближається до форми газового струменя з гострим кутом розкриття. Причому для довших каналів (L/d = 8 та 14) підвищення температури в інтервалі 160...210 °С практично не змінює його форми (рис.7).

Результати дослідів по витратним характеристикам для всіх каналів було зведено до залежності виду

$$\frac{j}{\mu} = f(\Delta p), \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} \text{ (рис. 8).}$$

Як видно з рисунку, експериментальна витрата перегрітої води лежить в межах між витіканням ідеальної рідини, що розраховується за рівнянням

$$\text{Бернуллі } \frac{j}{\mu} = \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho_l}, \text{ та ідеального газу, витрату}$$

якого можна знайти за рівнянням Сен-Венана:

$$\frac{j}{\mu} = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \cdot P_0 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k}{R \cdot T_0 \cdot (k+1)}}$$

Характер та поведінка отриманих експериментальних даних в цілому підтверджується експериментальними та аналітичними дослідженнями [4-8], що говорить про адекватність отриманих результатів та можливість використання зібраного стенду для експериментального дослідження процесу розпилення перегрітої води.

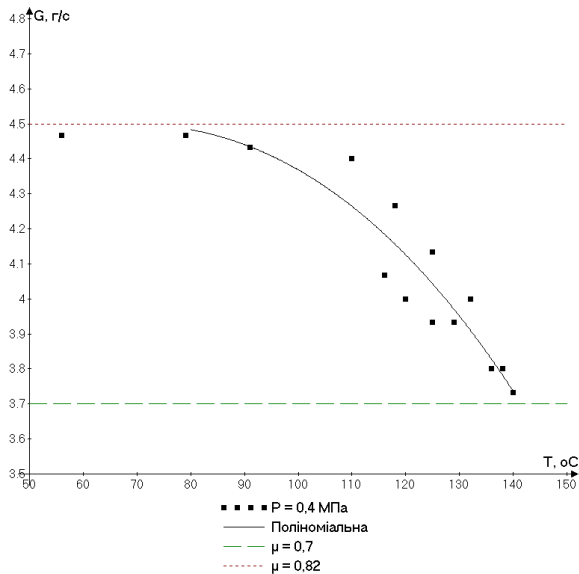


Рис.6. Залежність витрати води від початкової температури при постійному тиску  $P=0,4$  МПа для каналу  $L/d = 2$



Рис. 7. Зовнішній вигляд струменя перегрітої води  $L/d = 8, T = 180$  °C

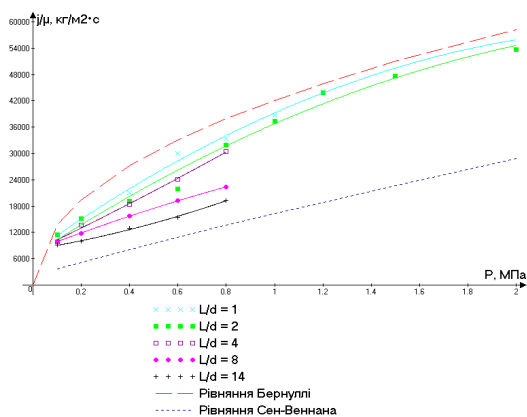


Рис. 8. Вплив довжини каналу на витрату перегрітої води в залежності від початкового тиску

#### 4. Визначення розміру крапель

Уловлення крапель води здійснювалося за допомогою спеціально розробленого пристрою, який відсікав частину крапель з потоку на предметне скло з імерсійним середовищем. При цьому існувала можливість регулювання швидкості руху затвору, що дозволяло для різних дослідів регулювати кількість крапель, які потрапляли на предметне скло. Пристрій розміщувався на відстані 400 мм від сопла.

При початкових температурах до 170°C в поле пристрою для вловлювання крапель періодично потрапляли суцільні струмені води, що говорить про неповну завершеність розвалу струменя на окремі краплі в даному діапазоні температур. Для випадку використання в якості розпилювача простого сопла даний рівень температури не представляє значного інтересу.

Розподілення для крапель при різній початковій температурі води зображено відповідно на рис. 9...11. Тиск в котлі в усіх дослідів відповідав насиченню при даній температурі.

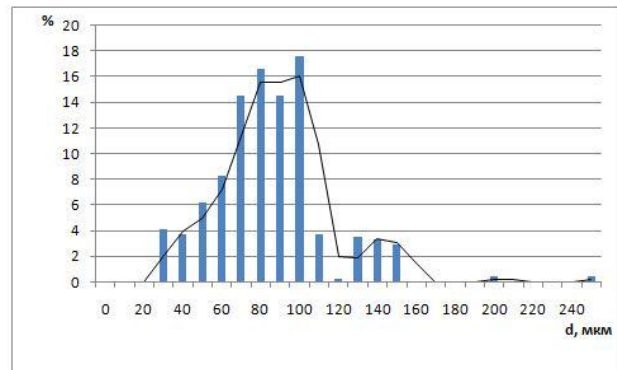


Рис. 9. Розподілення крапель по діаметру при  $T = 180$ °C,  $L/d = 1$

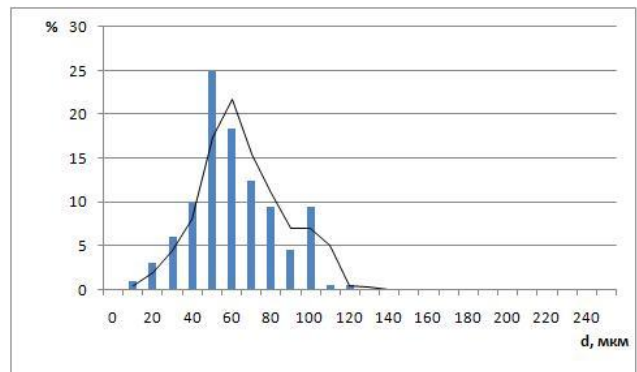


Рис. 10. Розподілення крапель по діаметру при  $T = 195$ °C,  $L/d = 1$

З рисунків видно, що із зростанням початкової температури води середній діаметр крапель зменшується та реалізується більш вузьке розподілення крапель по діаметру.

Характерні фото уловлених крапель зображено на рис. 12.

Отримані результати показують, що система розпилення з використанням перегрітої води дозволяє реалізувати диспергацію рідини з якістю,



яка задовольняє вимогам цілої низки технологічних процесів. При цьому реалізація розпилення можлива навіть при застосуванні максимально простої форсунки.

Але, з іншого боку, очевидно, що даний спосіб розпилення заслуговує серйозної уваги лише при наявності постійного джерела вторинних енергоресурсів з температурою необхідного рівня. З цієї точки зору одним з найбільш перспективних варіантів застосування перегрітої води є реалізація контактного охолодження циклового повітря газотурбінної установки [3, 9]. В цьому випадку, крім безпосереднього вирішення задачі розпилення, додатково вдається частково повернути теплоту відпрацьованих газів в цикл енергоустановки.

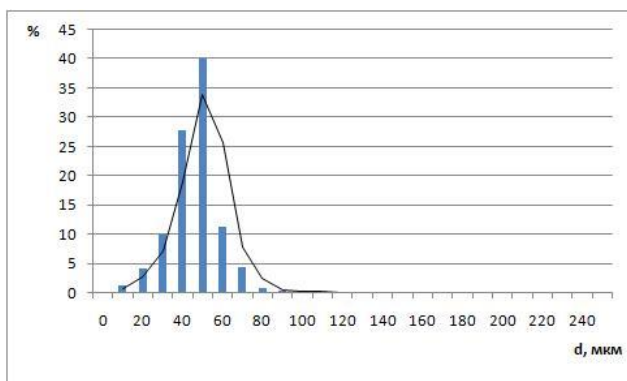


Рис. 11. Розподілення крапель по діаметру при  $T = 215^{\circ}\text{C}$ ,  $L/d = 1$

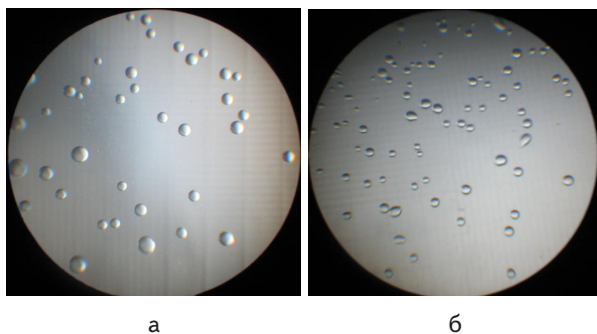


Рис. 12. Фото уловлених крапель: час відкриття затвору 9мс; збільшення 56х: а)  $T = 180^{\circ}\text{C}$ ; б)  $T = 215^{\circ}\text{C}$

## 5. Висновки

1. Для всіх досліджених режимів, незалежно від довжини каналу, зафіксовано падіння витрати перегрітої води в порівнянні із експериментальним значенням для холодної води. При цьому, чим довше канал, тим більш суттєво зменшення витрати, що пояснюється більш повним завершенням процесу пароутворення всередині каналу. Як наслідок, із зростанням довжини каналу витрата рідини і форма струменя наближаються до умов витікання газового струменя.
2. Для коротких каналів ( $L/d < 3$ ) витрату перегрітої води можна наближено знаходити за рівнянням Бернуллі. При цьому зменшення витрати враховується за рахунок зменшення (уточнення) гідралічного коефіцієнту витрати  $\mu$  в порівнянні з його значенням для витікання холодної води.
3. Інтенсивний розпад струменя перегрітої води на окремі краплі починається з температури  $175\text{...}180^{\circ}\text{C}$ . Для даного випадку має місце широке розподілення крапель по діаметру: від 30 мкм до 150 мкм і навіть більше для окремих масивних крапель.
4. Із зростанням початкової температури води середній діаметр крапель зменшується та реалізується більш вузьке розподілення крапель по діаметру. Так при температурі  $215^{\circ}\text{C}$  80% крапель по масі мають діаметр менше 60 мкм.
5. Використання перегрітої води для розпилення в чистому вигляді можливе лише в окремих випадках (наприклад, для ГТУ). Проте, перегріву різного рівня можуть бути використані для покращення існуючих варіантів розпилення, коли на відомий ефект додатково накладається скипання метастабільної рідини. Визначення впливу перегріву рідини на роботу різного типу форсунок потребує окремого дослідження.

## Література

1. Лыков, М.В. Распылительные сушилки / Лыков М.В., Леончик Б.И. – Москва, 1966. – 333 с.
2. Домбровский, Л.А. Распыление перегретой воды: результаты экспериментальных исследований / Домбровский Л.А., Залкинд В.И. и др. // Теплоэнергетика. – 2009. – №3. – с.12-20
3. Алексеев, В.Б. Теплофизические и инженерные проблемы мелкодисперсного распыла и впрыска воды в компрессор ГТУ / Алексеев В.Б., Залкинд В.И., Зейгарник Ю.А. и др. // Труды пятой Российской Национальной Конференции по Теплообмену. – 2010. – Том 5. – с.125-128
4. Зысин, В.А. Вскипающие адиабатные потоки / Зысин В.А., Баранов Г.А., Барилевич В.А., Парфенова Т.Н. – Москва: Атомиздат, 1976. – 152 с.
5. Исаев, О.А. Формы распада свободной струи вскипающей жидкости / Исаев О.А., Неволин М.В., Уткин С.А. // Термодинамика метастабильных систем: Сборник научных трудов. Свердловск: УрО АН СССР. – 1989. – с.33-39
6. Решетников, А.В. Динамика пульсаций при взрывном вскипании струй перегретой воды / Решетников А.В., Мажейко А.Н., Беглецов В.Н., Скоков В.Н., Коверда В.П. // Письма в ЖТФ. – 2007. – Том 33. – вып.17. – с.31-37
7. Решетников, А.В. Неравновесные фазовые переходы в струе сильно перегретой жидкости / Решетников А.В., Мажейко А.Н., Скоков В.Н., Коверда В.П. // Теплофизика высоких температур. – 2007. – том 45. – №6. – с.838-846

8. Павлов, П.А. Динамика вскипания сильно перегретых жидкостей. Свердловск: УРО АН СССР, 1988
9. Ануров, Ю.М. Расчетное исследование влияния впрыска воды на характеристики компрессора газотурбинной установки ГТ-009 / Ануров Ю.М., Пеганов А.Ю., Скворцов А.В. и др. // Теплоэнергетика. – 2006. – №12. – с.19-24.

### Abstract

*Despite the intensive research of adiabatic boiling flows there are virtually no data in literature on the size of droplets, formed at the exit of a nozzle after «explosive boiling». The article shows the results of experimental research of the process of leakage of superheated water through short cylindrical channels. The allocation and the size of droplets, formed as a result of the collapse of a flow of superheated water, were presented; the shape and sizes of the flare for water temperature in the range 100 ... 220 °C were described. In addition, the effect of water temperature and form of a channel for consumable nozzle characteristics was studied. The results show that the atomization system using superheated water can realize the dispergation of fluid of quality that meets the requirements of a number of technological processes. The atomization is possible even when using the simplest possible jet. At the same time, possible areas of application of superheated water for atomization are limited by systems, in which there is a constant source of waste energy with temperature of required level. From this point of view, one of the most promising variants of use of superheated water is the realization of contact cooling of cyclic air of gas turbine installations*

**Keywords:** *adiabatic boiling flows, atomization, diameter of a drop*

**Визначені параметри Q3D-течії в міжлопаткових каналах для нерухомої та за умови обертання робочої решітки газової турбіни за допомогою розв'язування прямих задач. Спроектвані міжлопаткові канали нових решіток і відповідні їм профілі за допомогою оберненої задачі. Визначений вплив обертання, форми поверхні течії і граничних умов оберненої задачі на геометричні характеристики профілів та на коефіцієнти профільних втрат нових решіток**

**Ключові слова:** *газова турбіна, робоча решітка, профіль, міжлопатковий канал, пряма і обернена задачі*

**Определены параметры Q3D-течения в межлопаточных каналах для неподвижной и вращающейся рабочей решетки газовой турбины, используя решения прямых задач. Спроектированы межлопаточные каналы новых решеток и соответствующие им профили с помощью обратной задачи. Определено влияние вращения, формы поверхности тока и граничных условий обратной задачи на геометрические характеристики профилей и на коэффициенты профильных потерь решеток**

**Ключевые слова:** *газовая турбина, рабочая решетка, профиль, межлопаточный канал, прямая и обратная задачи*

УДК 621.165

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОФИЛЕЙ РАБОЧЕЙ РЕШЕТКИ ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ С ПОМОЩЬЮ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ

**В. П. Субботович**

Кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник

Кафедра турбиностроения

Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт»  
ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002

Контактный тел.: (057) 707-63-68

E-mail: alex78ua@yahoo.com

### 1. Введение

Надежность и экономичность проточных частей турбин в значительной степени определяется совершенством сопловых и рабочих решеток. Поэтому проблема создания высокоэффективных, технологических и надежно работающих лопаточных аппаратов

была и остается в центре внимания специалистов, которые занимаются турбиностроением.

На практике при проектировании лопаток используют нормали, ОСТы, атласы экспериментально проверенных профилей с относительно низкими коэффициентами потерь. Их применяют в течение десятков лет, поскольку создать высокоэкономичный профиль – сложная и дорогостоящая исследовательская задача.