

**А.А. Иванова /к.т.н./**

ГУ «Институт прикладной математики и механики» (Донецк)

**В.А. Капитанов**

НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха (Москва)

**А.Б. Бирюков /д.т.н./, В.В. Худотёпль**

ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ ВОДОВОЗДУШНЫМИ ФОРСУНКАМИ

*В работе опробована методика определения коэффициентов теплоотдачи при охлаждении твердых поверхностей, имеющих высокую температуру, щелевыми водовоздушными форсунками при помощи экспериментального стенда на базе стационарного калориметра. Выполнены оценки погрешности определения коэффициентов теплоотдачи.*

**Ключевые слова:** коэффициент теплоотдачи, непрерывнолитая заготовка, водовоздушная форсунка, стационарный калориметр, оценка погрешности эксперимента.

### Постановка проблемы

Процессы, протекающие в зоне вторичного охлаждения (ЗВО) машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), играют важную роль в формировании качества непрерывнолитых слитков. В зависимости от среды, используемой для охлаждения поверхности заготовок, различают водяное и водовоздушное охлаждение [1].

При проектировании зоны вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок необходима информация о значениях коэффициента теплоотдачи на участках поверхности слитка, орошаемых водой или водовоздушной смесью. Коэффициент теплоотдачи (КТ) зависит от типа форсунки, подающей охлаждающую среду, а также от расходов воды или воды и воздуха.

Также эта информация необходима для задания граничных условий теплообмена на поверхности заготовки при математическом моделировании процессов формирования непрерывнолитого слитка [1...3].

### Анализ последних исследований и публикаций

Задачи экспериментального определения значений коэффициентов конвективной теплоотдачи успешно решаются уже несколько десятилетий. Например, одним из типичных методов определения коэффициентов теплоотдачи форсунок является метод «подвижной форсунки» [4]. Стальная плита с 24 термоэлементами, с глубиной заделки 2,5 мм нагревается в печи инертным газом до 1200 °C. Верхняя поверхность пластины изолирована, нижняя подвержена действию струи испытываемой форсунки.

Подвижный рычаг, на котором закреплена форсунка, перемещается параллельно пластине с помощью контролируемого компьютером электромотора. Для моделирования перемещения заготовки между роликами автоматически удаляется защитный кожух над пластиной. Форсунка перемещается слева направо с открытым кожухом, в обратную сторону – с закрытым. Температура пластины и охлаждающей воды изменяется до тех пор, пока температура пластины не достигнет температуры охлаждающей среды. Показания термоэлементов и положение форсунки относительно пластины записываются в базу данных, которая затем используется для восстановления граничных условий.

Подобные устройства для определения коэффициента теплоотдачи, которые для определённости будем называть нестационарными калориметрами (с целью отличать их от стационарных калориметров, о которых речь далее), безусловно, могли бы с успехом использоваться при низких значениях коэффициента теплоотдачи или при малых плотностях тепловых потоков. Однако при наблюдаемых в ЗВО плотностях тепловых потоков около одного мегаватта на квадратный метр градиенты температуры в охлаждающейся нагретой пластине столь велики, что корректное восстановление граничных условий становится проблематичным.

Так, исследователи фирмы Spraying Systems Co., работая на принадлежащем этой фирме нестационарном калориметре, получили значение критической температуры (очевидно, имеется в виду кризис кипения первого рода) для воды 270...400 °C, а точки Лейденфроста –

520...700 °C [5], что совершенно не соответствует общизвестным данным [6].

Поэтому более перспективными для определения коэффициента теплоотдачи при значительных плотностях теплового потока представляются стационарные калориметры, в которых охлаждаемая в факеле форсунки поверхность пребывает при постоянной температуре благодаря постоянному подводу энергии извне – индуктивному или прямому резистивному нагреву.

Дополнительным достоинством стационарных калориметров являются их малые размеры и легкость перемещения, благодаря чему несложно определяются не только средние по факелу, но и локальные значения коэффициента теплоотдачи, что позволяет строить эпюры коэффициентов теплоотдачи. Их построение особенно важно, если ставится цель не просто охладить металл, но обеспечить должную равномерность его охлаждения, избежать локальных перегревов и переохлаждений. Ведущие металлургические корпорации располагают таким оборудованием [7,8].

Важной задачей для отечественной металлургии является создание и использование оборудования для экспериментального определения значений коэффициентов конвективной теплоотдачи при форсуночном охлаждении. Это даст возможность проверять характеристики иностранных форсунок и получить инструмент для производства эффективных отечественных форсунок.

### Цель (задачи) исследования

Целью настоящей работы является апробация методики определения коэффициентов теплоотдачи при охлаждении твердых поверхностей, имеющих высокую температуру, щелевы-

ми водовоздушными форсунками и оценка погрешности результатов экспериментов.

### Основной материал исследования

В принципе задача определения коэффициентов теплоотдачи при охлаждении твердой поверхности жидкостью или газожидкостной смесью может быть решена при помощи методики, описанной в [4]. В рамках этой методики можно использовать электрический калориметр, представляющий собой нагреватель с прикрепленной к нему термопарой [5,6].

Принцип действия калориметра основан на равенстве при стационарном тепловом режиме подводимой к нагревателю электрической мощности и отводимого теплового потока:

$$I^2 R = (\alpha + \alpha_0)(T_w - T_0)F, \quad (1)$$

где  $I$  – сила тока, проходящего через нагреватель, А;  $R$  – сопротивление нагревателя, Ом;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи на охлаждаемой поверхности нагревателя, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\alpha_0$  – коэффициент теплоотдачи на неохлаждаемой поверхности нагревателя, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $T_w$  и  $T_0$  – температуры поверхности и охлаждающей среды, °C;  $F$  – площадь нагревателя, м<sup>2</sup>.

Схема установки для определения коэффициентов конвективной теплоотдачи представлена на рис. 1.

С использованием этой схемы была разработана установка для экспериментального определения коэффициента теплоотдачи при охлаждении водовоздушными форсунками. Фото узла стационарного калориметра представлено на рис. 2а, а общий вид стенда для исследования работы форсунок представлен на рис. 2б.

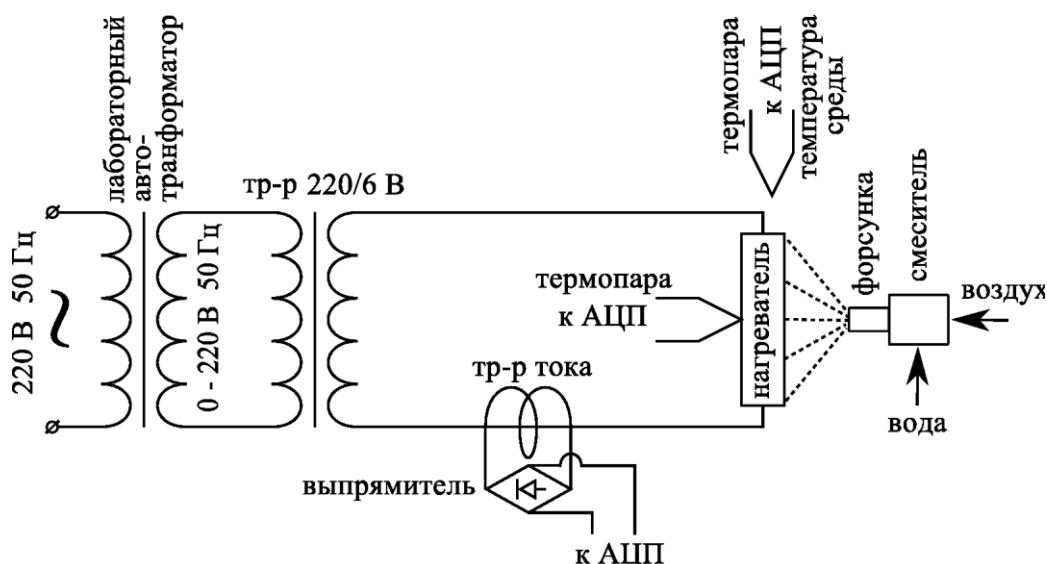


Рис. 1. Схема установки для определения коэффициента теплоотдачи

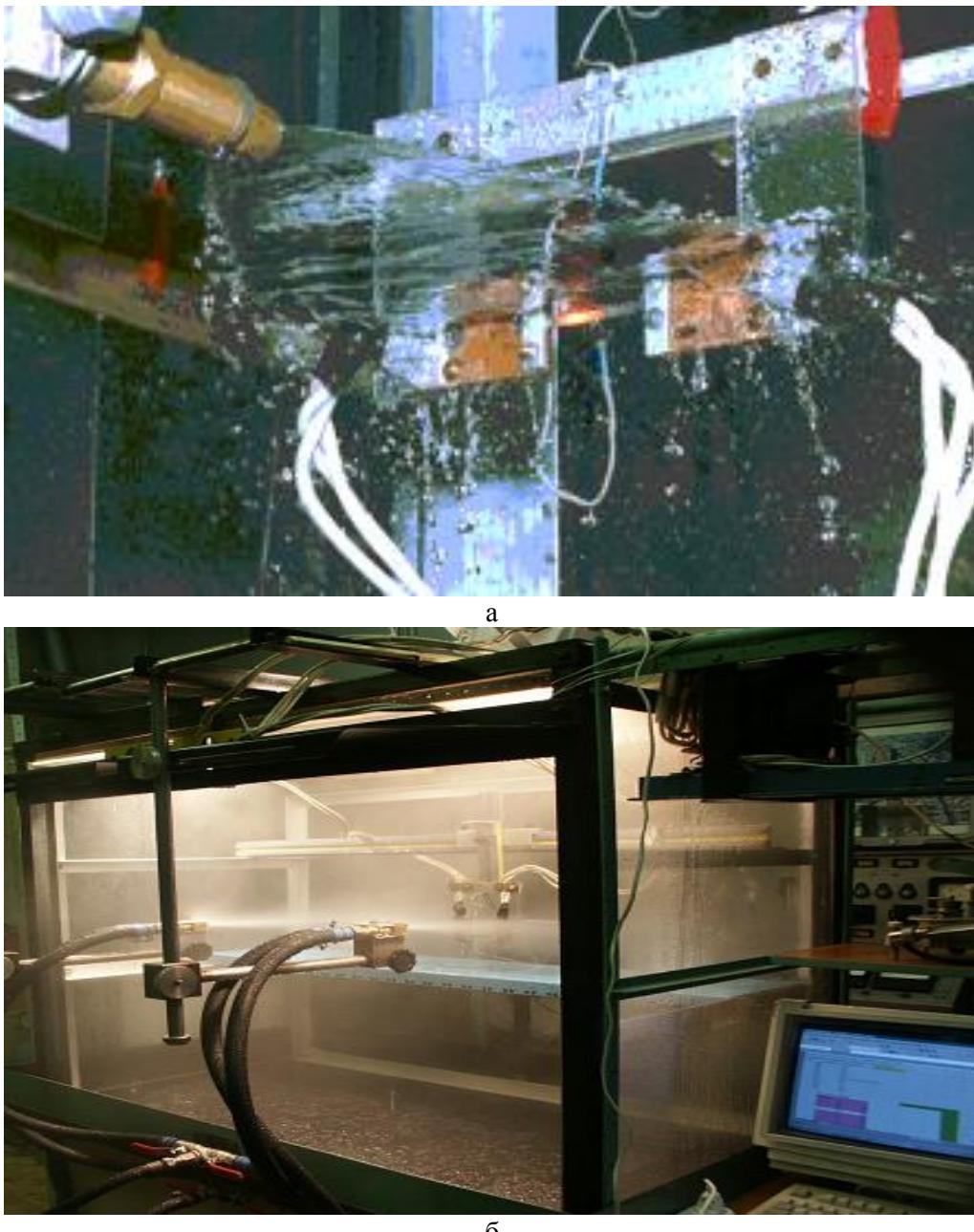


Рис. 2. Стенд для исследования работы форсунок:  
а – узел стационарного калориметра; б – общий вид стенда

Форсунка соединена с ресивером сжатого воздуха и водяным насосом при помощи гибких шлангов и снабжена механизмом, позволяющим выполнять горизонтальное и вертикальное перемещения. Величины перемещения контролируются при помощи специальных координатников.

Это дает возможность исследовать значения коэффициентов конвективной теплоотдачи в разных точках факела.

Для отработки режима проведения эксперимента важно учитывать, что вид кривой, описывающей зависимость коэффициента теплоотдачи от температуры поверхности при водовоздушном охлаждении, носит немонотонный характер

(рис. 3) [9,10].

Такой характер зависимости объясняется качественными изменениями в режиме кипения, происходящими при изменении температуры. Вследствие немонотонности зависимости коэффициента теплоотдачи (и плотности теплового потока) от температуры не представляется возможным плавное повышение температуры нагревателя при увеличении подводимой мощности. Поэтому охлаждение нагревателя должно начаться в области температур справа от максимума. Для этого необходимо вывести форсунку на требуемый режим работы, установить нагреватель в исследуемой точке струи, затем отсечь струю от нагревателя, разогреть нагреватель до

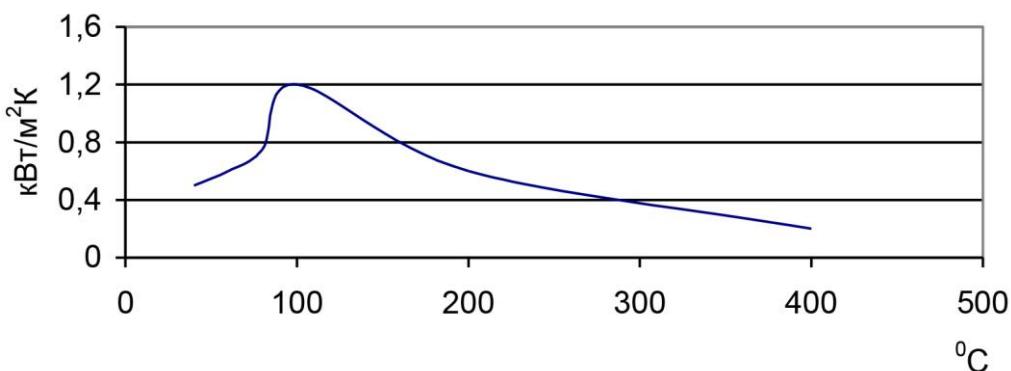


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплоотдачи от температуры поверхности

температуры 600...700 °C и убрать отсекающую пластину, направив струю на нагреватель и одновременно увеличивая подаваемую мощность.

Таким образом можно обеспечить устойчивую работу нагревателя при струйном охлаждении в диапазоне температур 700...1200 °C.

При обработке экспериментальных данных коэффициент теплоотдачи вычисляется по формуле:

$$\alpha = \frac{I^2 \rho_n}{a_n^2 b_n (T_w - T_0)} - \alpha_0, \quad (2)$$

где  $\rho_n$  – удельное сопротивление материала нагревателя, Ом·м;  $L_n$  – длина нагревателя, м;  $a_n$  – ширина нагревателя, м;  $b_n$  – высота нагревателя, м.

Погрешность косвенных измерений  $\alpha$  определяется по формуле, полученной на базе общепринятых подходов по оценке погрешности косвенных измерений [11]:

$$\Delta\alpha = \left( \left( \frac{\partial\alpha}{\partial I} \right)^2 (\Delta I)^2 + \left( \frac{\partial\alpha}{\partial T_w} \right)^2 (\Delta T_w)^2 + \left( \frac{\partial\alpha}{\partial T_0} \right)^2 (\Delta T_0)^2 \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (3)$$

После подстановки выражений производных, получаемых при дифференцировании выражения (2), и приведения подобных слагаемых, получаем окончательное выражение для оценки погрешности определения значений коэффициентов конвективной теплоотдачи:

$$\Delta\alpha = \frac{I\rho_n}{a_n^2 b_n (T_w - T_0)} \times \times \left( 4(\Delta I)^2 + \frac{I^2}{(T_w - T_0)^2 ((\Delta T_w)^2 + (\Delta T_0)^2)} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

где  $\Delta I$ ,  $\Delta T_w$ ,  $\Delta T_0$  – погрешности разброса, которые возникают вследствие различия экспериментальных значений при многократном повторении измерений одной и той же величины.

Погрешности разброса могут быть установлены как в результате определения доверительных интервалов за счет статистической обработки нескольких значений соответствующих величин, попавших в случайные выборки, так и в зависимости от классов точности приборов.

Абсолютная погрешность измерения физической величины оценивается через класс точности следующим образом [11]:

$$\chi_{\text{к.м.}} = \left( \frac{\gamma}{100} \right) A,$$

где  $\gamma$  – класс точности, %, указанный на панели прибора;  $A=A_{\max}$  – предел измерения для стрелочных приборов, либо  $A$  – текущее значение для магазинов сопротивления, индуктивности, емкости.

Созданный стенд для экспериментального изучения коэффициентов теплоотдачи при охлаждении твердых поверхностей щелевыми водовоздушными форсунками имеет следующие значения характеристик, необходимых как для определения самих коэффициентов теплоотдачи (2), так и оценки погрешности их определения (4).

Поперечные размеры нагревателя:  $a_n=0,0039$  м,  $b_n=0,0009$  м.

Удельное сопротивление материала нагревателя  $\rho_n$  (при 1000 °C) –  $9,30 \cdot 10^{-7}$  Ом·м.

Ток измеряется электрическими клещами с пределом измерения 600 А и классом точности 0,5.

Температуры нагревателя и окружающей среды измеряются при помощи хромель-алюмелевой термопары (ТХА). Погрешности измерения выбираются в зависимости от диапазона измерения (табл. 1).

Табл. 1. Погрешности измерения температуры при помощи хромель-алюмелевой термопары в разных температурных диапазонах

Обозначение промышленного термопреобразователя	Обозначение типа термопары	Класс допуска	Диапазон измерений		Пределы доп. отклонений ТЭДС от НСХ
			от	до	
Термопара TXA	K	3	-250	-167	$0,015 \cdot t$
			-167	-40	2,5
		2	-40	333	2,5
			333	1300	$0,0075 \cdot t$
		1	-40	375	1,5
			375	1000	$0,004 \cdot t$

Пример результатов по установлению распределения коэффициентов теплоотдачи по факелу водовоздушной форсунки для разных типов форсунок и расходов охладителя представлен на рис. 4.

Результаты оценки погрешностей определения коэффициентов теплоотдачи вдоль малой и большой диагоналей эллиптического факела форсунки «Корад» при расходе воды  $0,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ , воздуха –  $3,59 \text{ нм}^3/\text{ч}$  приведены на рис. 5.

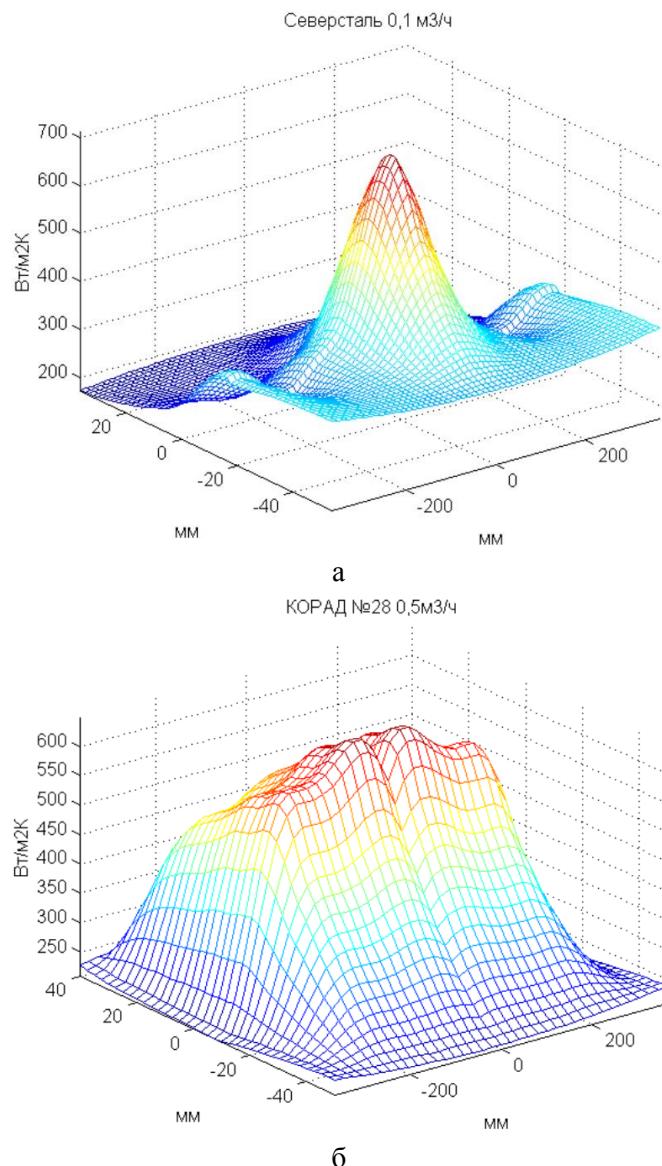


Рис. 4. Распределение коэффициента теплоотдачи:

а – для форсунки «Северсталь» и расхода воды  $0,1 \text{ м}^3/\text{ч}$ , воздуха –  $31,53 \text{ нм}^3/\text{ч}$ ;  
б – для форсунки фирмы «Корад» при расходе воды  $0,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ , воздуха –  $3,59 \text{ нм}^3/\text{ч}$

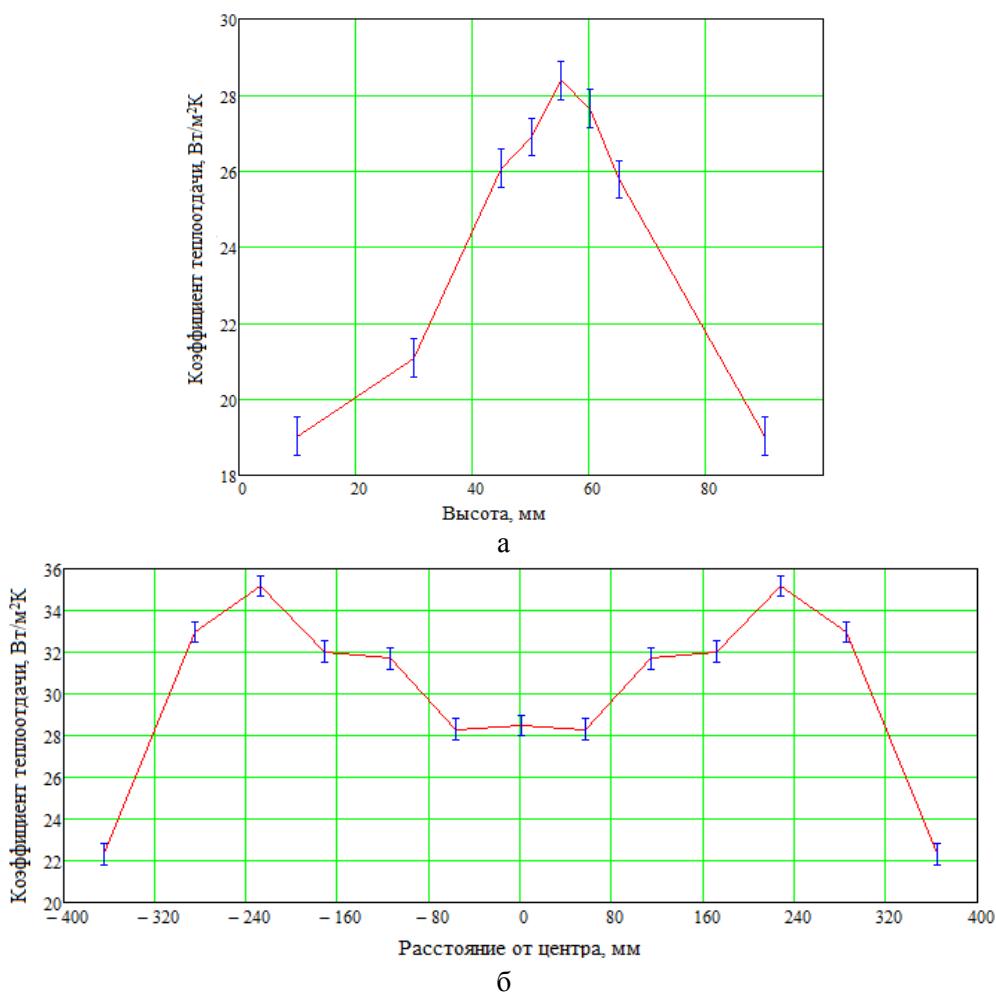


Рис. 5. Распределение коэффициента теплоотдачи и оценка погрешности измерения:  
а – по высоте факела на вертикальной оси; б – по ширине факела на горизонтальной оси

## Выводы

В работе апробирована методика определения коэффициентов теплоотдачи при охлаждении твердых поверхностей щелевыми водовоздушными форсунками на базе экспериментального стенда со стационарным калориметром и выполнена оценка погрешности результатов экспериментов, основываясь на классах точности используемых измерительных приборов. Для созданного стенда погрешность определения значений коэффициентов теплоотдачи составляет 5...10 %.

## Список литературы

1. Smirnov, A.N. Nepreryvnaya razlivka stali [Continuous casting of steel] / A.N. Smirnov, S.V. Kuberskij, E.V. Shtepan. – Donetsk: DonNTU Pupl., 2011. – 482 p.
2. Бирюков, А.Б. Современные подходы к эффективному управлению теплотехническими процессами в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ /А.Б. Бирюков, А.А. Иванова // Бюллетень «Черная металлургия». – 2015. – №3. – С. 46-51.
3. Biryukov, A.B. Method of determining an efficient rate for the secondary cooling of a continu-
- ous-cast slab / A.B. Biryukov, A.A. Ivanova // Metallurgist. – 2015. – Vol.58. Iss.11-12. – P. 967-972.
4. Bending, L. Heat Transfer of Twin Fluid Nozzles for Continuous Casting at different Test Conditions / L. Bending, M. Raudensky, J. Horsky // 13th International Conference of Liquid Atomization and Spray Systems, July 9-11, 1997, Florence. – Florence: ILASS, 1998. – P. 230-244.
5. Hamed M. Al-Ahamdi, Yao, S.C. Experimental Study on the Spray Cooling of High Temperature Metal using Full Cone Industrial Sprays // 85th Steelmaking Conference, Iron and Steel Society, Nashville, TN, March 2002, Pennsylvania. – Pittsburgh: Spray Analysis and Research Services, 2002. – P. 8.
6. Кутателадзе, С.С. Гидродинамика газожидкостных систем / С.С. Кутателадзе, М.А. Стырикович. – М.: Энергия, 1976. – 296 с.
7. Айзин, Ю.М. Новый стенд для исследования характеристик факела щелевых форсунок слябовых МНЛЗ / Ю.М. Айзин и др. // Сталь. – 2003. – №12. – С.25-26.
8. Геращенко, О.А. Основы теплометрии. – Ки-

- ев: Наукова думка, 1971. – 191 с.
9. Исаченко, Н.С. Струйное охлаждение / Н.С. Исаченко, Г.В. Кушнырев. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 216 с.
10. Мастрюков Б.С. Термофизика металлургических процессов / Б.С. Мастрюков, Г.С. Сбор-
- щиков. – М.: Металлургия, 1996. – 268 с.
11. Кравченко, Н.С. Методы обработки результатов измерений и оценки погрешностей в учебном лабораторном практикуме / Н.С. Кравченко, О.Г. Ревинская // Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 86 с.

**A.A. Ivanova /Cand. Sci. (Eng.)/**

*Institute of Applied Mathematics and Mechanics (Donetsk)*

**V.A. Kapitanov**

*Research Institute «Polus» named after M.F. Stelmakh (Moscow)*

**A.B. Biryukov /Dr. Sci. (Eng.)/, V.V. Khudoteply**

*Donetsk National Technical University (Donetsk)*

## EXPERIMENTAL DETERMINATION OF HEAT TRANSFER COEFFICIENTS WHEN COOLING OF CONCAST BILLETS WITH THE WATER-AIR NOZZLES

**Background.** To design machines for continuous casting of billets and set the boundary conditions of heat exchange in the modeling of processes of formation of the concast billets, it is necessary to have real coefficient values of heat transfer on the billet surface, cooled by torches of water or water-air nozzles. An important task is to create and test in domestic conditions the methods for determining the heat transfer coefficients when cooling solid surfaces with water-air nozzles.

**Materials and/or methods.** The experimental stand based on a stationary electric calorimeter, which is a heater with a thermocouple attached to it. The investigated nozzle is connected with a receiver of compressed air and the water pump by means of a flexible hose and has a mechanism that allows for horizontal and vertical movement. This makes it possible to study the values of the convective heat transfer coefficients at different points of the torch. The error of indirect determination of heat transfer coefficients determined by the equation obtained on the basis of generally accepted approaches to the estimation of the error of indirect measurements, depending on the accuracy of sensing elements and devices used in the creation of the stand.

**Results.** As a result of the experiments, the distribution of heat transfer coefficients on the torches of various water-air nozzles for different air and water flows obtained. According to the estimates, the error in determining the desired values used in the creation of the stand of measuring devices (chromel-alumel thermocouples for measuring the temperature on the heater surface and the surrounding medium and the current clamp of 0.5 accuracy class) is 5...10 %.

**Conclusion.** The tested method for determining the heat transfer coefficients for cooling solid surfaces with water-air nozzles provides opportunities for research and creation of domestic effective nozzles for cooling concast billets.

**Keywords:** heat transfer coefficient, concast billet, water-air nozzle, stationary calorimeter, estimation of error of the experiment.

### Сведения об авторах

**А.А. Иванова**

SPIN-код: 6560-2868  
Author ID: 54935647300  
ORCID iD: 0000-0003-0573-8859  
Телефон: +380 (62) 311-04-36  
Эл. почта: ivanova.iamm@mail.ru

**А.Б. Бирюков**

SPIN-код: 3186-0680  
Author ID: 7006918782  
ORCID iD: 0000-0002-8146-2017  
Телефон: +380 (50) 260-97-75  
Эл. почта: birukov.ttf@gmail.com

**В.А. Капитанов**

Телефон: +7 (495) 333-91-44  
Эл. почта: kapitanov\_v\_a@mail.ru

**В.В. Худотёпль**

Телефон: +380 (71) 308-78-17  
Эл. почта: voita0116@gmail.com