

Иванова А. А., Институт прикладной математики и механики, г. Донецк
Капитанов В. А., НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха, г. Москва
Бирюков А. Б., Донецкий национальный технический университет, г. Донецк
Худотёпный В. магистрант ДонНТУ

Экспериментальное определение коэффициентов теплоотдачи при охлаждении непрерывнолитой заготовки водовоздушными форсунками

Аннотация.

Background. Для проектирования машин непрерывного литья заготовок и задания граничных условий теплообмена при моделировании процессов формирования непрерывнолитых заготовок необходимо иметь реальные значения коэффициентов теплоотдачи на поверхностях заготовки, охлаждаемых факелами водяных или водовоздушных форсунок. Иностранные компании имеют стенды для исследования характеристик форсунок. Важной задачей является создание и апробирование в отечественных условиях методики определения коэффициентов теплоотдачи при охлаждении твердых поверхностей водовоздушными форсунками.

Materials and methods. Экспериментальный стенд создан на базе стационарного электрического калориметра, представляющего собой нагреватель с прикреплённой к нему термопарой. Исследуемая форсунка соединяется с ресивером сжатого воздуха и водяным насосом при помощи гибких шлангов и снабжена механизмом, позволяющим выполнять горизонтальное и вертикальное перемещения. Это дает возможность исследовать значения коэффициентов конвективной теплоотдачи в разных точках факела. Погрешность косвенного определения коэффициентов теплоотдачи определяется при помощи выражения, полученного на базе общепринятых подходов по оценке погрешности косвенных измерений, в зависимости от классов точности использованных при создании стенда чувствительных элементов и приборов.

Results. В результате проведения экспериментов получены распределения коэффициентов теплоотдачи по факелам различных водовоздушных форсунок для разных расходов воздуха и воды. Согласно выполненным оценкам погрешность определения искомой величины для использованных при создании стенда измерительных приборов (хромель-алюмелевые термопары для измерения температуры поверхности нагревателя и окружающей среды и токовые клещи с классом точности 0,5) составляет 5-10%

Conclusions. Апробированная в работе методика определения коэффициентов теплоотдачи при охлаждении твердых поверхностей водовоздушными форсунками создает перспективы для проведения исследований и создания эффективных форсунок отечественного производства для охлаждения непрерывнолитых заготовок.

Ключевые слова: коэффициент теплоотдачи,

Введение. 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 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].

Обзор состояния вопроса

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 °С. 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 измеряется 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, что то же самое, 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 С, а точки Лейденфроста –520-700 С [5], что совершенно не соответствует общеизвестным 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 лёгкость 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].

Для иллюстрации преимуществ стационарного калориметра перед нестационарным приведём результаты тестового эксперимента – определения на стационарном калориметре критической температуры кипения воды в факеле водовоздушной форсунки при расходе воды 0,25 м³/ч (рис. 1).

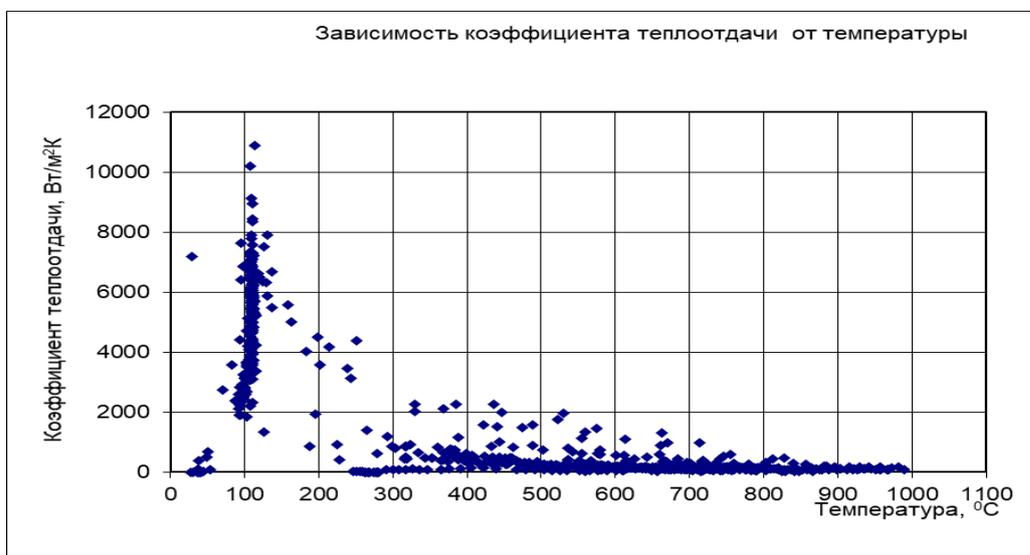


Рисунок 1 К определению критической температуры

Из рис. 1 явно следует, что критическая температура составляет около 110-130 °С, что вполне соответствует общеизвестным данным.

Важно 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.

Целью данной работы является апробация методики определения коэффициентов теплоотдачи при охлаждении твердых поверхностей, имеющих высокую температуру, щелевыми водовоздушными форсунками и оценка погрешности результатов экспериментов.

Изложение основного материала

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 прикреплённой 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,

α – коэффициент теплоотдачи на охлаждаемой поверхности нагревателя, Вт/м²К,

α_0 – коэффициент теплоотдачи на неохлаждаемой поверхности нагревателя, Вт/м²К,

T_w и T_0 – температуры поверхности и охлаждающей среды, °С

F – площадь нагревателя, м².

Схема установки для определения коэффициентов конвективной теплоотдачи представлена на рис. 2.

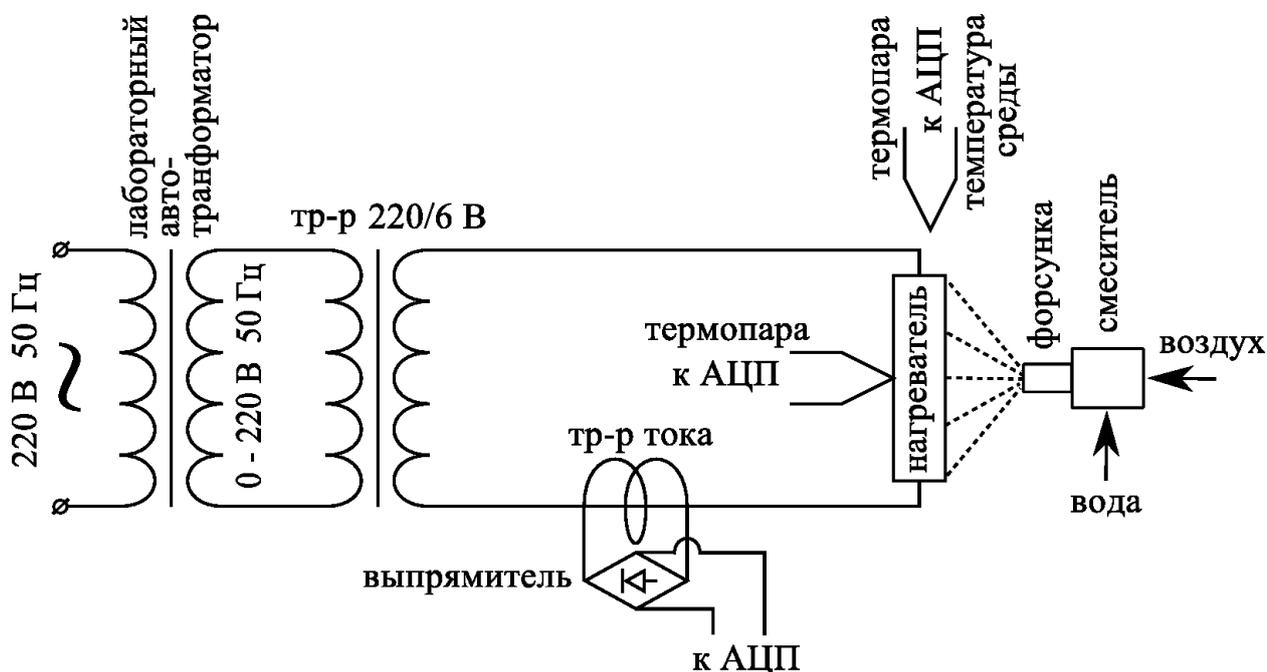


Рисунок 2 Схема установки для определения КТ

С использованием этой схемы была разработана экспериментальная установка для экспериментального определения коэффициента теплоотдачи при охлаждении водовоздушными

форсунками. Фото узла стационарного калориметра представлено на рис. 3а, а общий вид стенда для исследования работы форсунок представлен на рис. 3б.



Рисунок 3а Стационарная установка



Рисунок 3б Стенд для исследования работы форсунок (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 водо-воздушном охлаждении носит немонотонный характер (рис. 4) [9, 10].

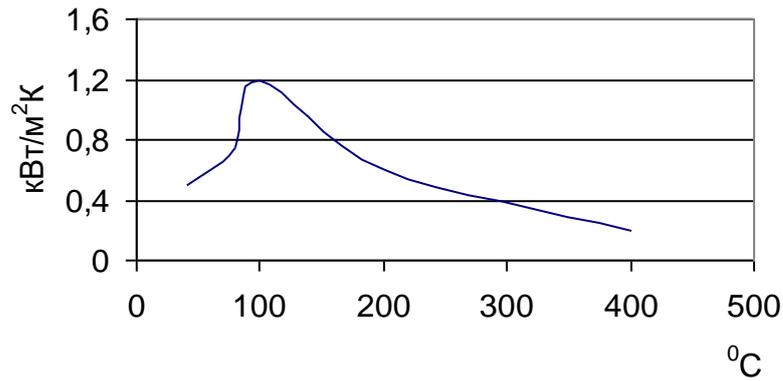


Рисунок 4 Зависимость коэффициента теплоотдачи от температуры поверхности

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 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

$$\alpha = (I^2 \rho_n L_n / \alpha_n b_n) / (L_n \alpha_n (T_w - T_0)) - \alpha_0 = I^2 \rho_n / \alpha_n^2 b_n (T_w - T_0) - \alpha_0, \quad (2)$$

где ρ_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 α определяется по формуле, полученной на базе общепринятых подходов по оценке погрешности косвенных измерений [11, 12]:

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

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

$$\Delta \alpha = \frac{I \rho_n}{\alpha_n^2 b_n (T_w - T_0)} \sqrt{4(\Delta I)^2 + \frac{I^2}{(T_w - T_0)^2 ((\Delta T_w)^2 + (\Delta T_0)^2)}} \quad (4)$$

где ΔI , ΔT_w , ΔT_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]:

$$\Delta \chi_{\text{к.т.}} = (\gamma / 100)A ,$$

где γ - класс точности в %, указанный на панели прибора,

$A = A_{\text{max}}$ – предел измерения для стрелочных приборов, либо A есть текущее значение для магазинов сопротивления, индуктивности, емкости

Созданный стенд для экспериментального изучения коэффициентов теплоотдачи при охлаждении твердых поверхностей щелевыми водо-воздушными форсунками имеет следующие значения характеристик, важных 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 ρ_n (при 1000 °С) $9,30 \cdot 10^{-7}$ Ом·м.

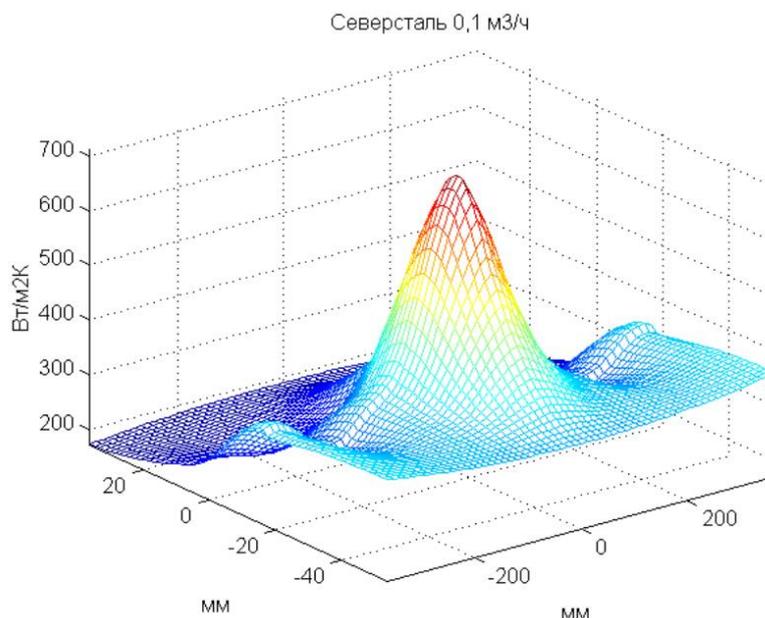
Ток измеряется электрическими клещами с пределом измерения 600А и классом точности 0,5.

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

Таблица Погрешности измерения температуры при помощи термопары ХА в разных температурных диапазонах

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

Пример результатов по установлению распределения коэффициентов теплоотдачи по факелу водо-воздушной форсункой для разных типов форсунок и расходов охладителя представлен на рисунке 5.



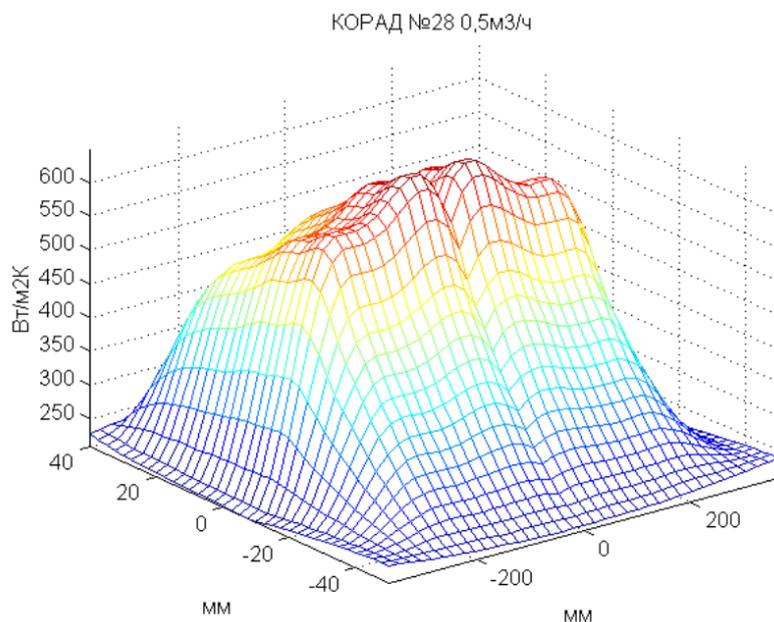


Рисунок 5 Распределение коэффициента теплоотдачи (а – для форсунки Северсталь и расхода воды 0,1 м³/ч, воздуха – 31,53 нм³/ч; б – для форсунки фирмы «Корад» при расходе воды 0,5 м³/ч, воздуха – 3,59 нм³/ч)

Результаты оценки погрешностей определения коэффициентов теплоотдачи вдоль малой и большой диагоналей эллиптического факела форсунки приведены на рис. 6.

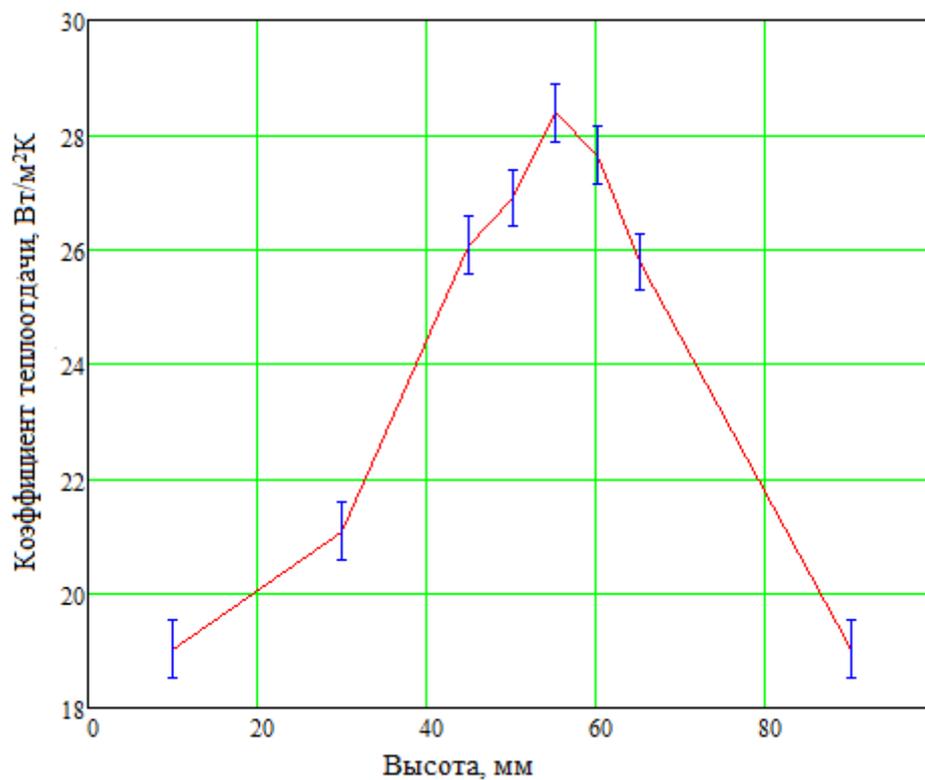


Рисунок 6а Распределение коэффициента теплоотдачи по высоте факела на вертикальной оси

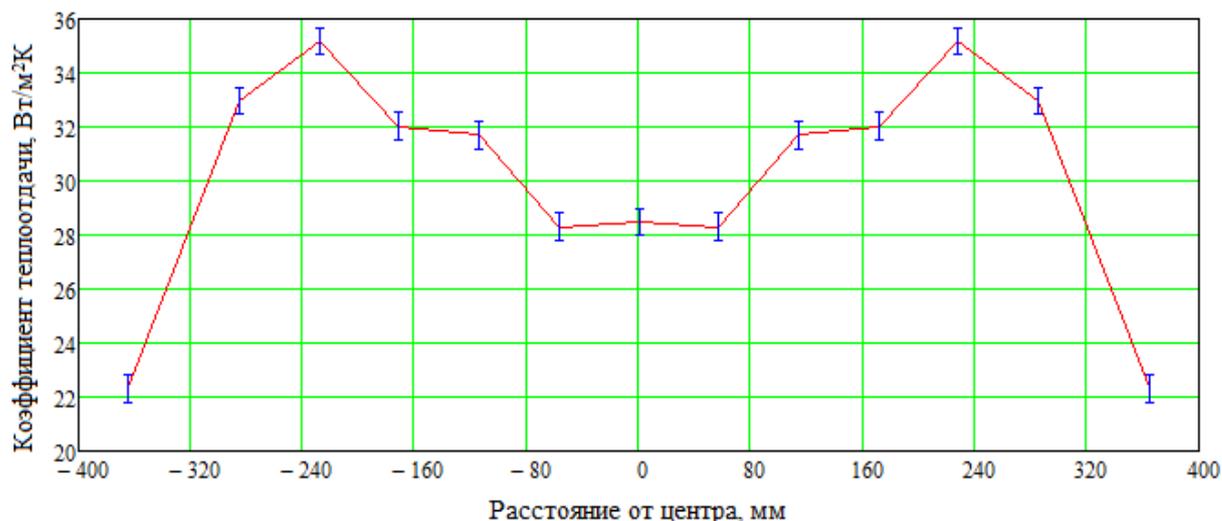


Рисунок 6б Распределение коэффициента теплоотдачи по ширине факела на горизонтальной оси

Выводы. В работе апробирована методика определения коэффициентов теплоотдачи при охлаждении твердых поверхностей щелевыми водо-воздушными форсунками и выполнена оценка погрешности результатов экспериментов, основываясь на классах точности используемых измерительных приборов.

Список литературы

1. Smirnov A. N., Kuberskij S. V., Shtepan E. V. *Nepreryvnaya razlivka stali* [Continuous casting of steel]. Donetsk, DonNTU Publ., 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 continuous-cast slab / A.B. Biryukov, A.A. Ivanova // *Metallurgist*. – March 2015, Volume 58, Issue 11–12, pp 967–972
4. Bending L., Raudensky M., Horsky J. Heat Transer of Twin Fluid Nozzles for Continuous Casting at different Test Conditions // 13th International Conference of Liquid Atomisation 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. – Pittsburg: Spray Analysis and Research Services, 2002. – P. 8.
6. Кутателадзе С.С. Гидродинамика газожидкостных систем / С.С. Кутателадзе, М.А. Стырикович // М.: Энергия, 1976. – С. 296.
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 теплотетрии / О.А. Геращенко // Киев: Наукова думка, 1971.
9. Исаченко Н.С. Струйное охлаждение поверхностей / Н.С. Исаченко, Г.В. Кушнырев // М.: Энергоатомиздат, 1974.
10. Матрюков Б.С. Теплофизика металлургических процессов / Б.С. Матрюков, Г.С. Сборщиков // М.: Металлургия, 1993
11. Кравченко Н.С. Методы обработки результатов измерений и оценки погрешностей в учебном лабораторном практикуме / Н.С. Кравченко, О.Г. Ревинская // Учебное пособие. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2011. – С. 88
12. Мухачев В.А. Физика. Оценка погрешностей измерений / В.А. Мухачев, А.Л. Магазинников // Методические указания для студентов всех специальностей. – Томск: ТУСУР, 2012. – С. 24