



*Н.А. Бормосов, В.П. Белоусова, А.А. Втулкин*  
Вологодский государственный университет

### ЭКСПРЕСС-МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОБМЕНА ПЛОСКОФАКЕЛЬНЫХ ФОРСУНОК

В статье представлена методика оперативного контроля теплообменных характеристик плоскофакельных форсунок с применением эффекта рассеивания света. Произведено тарирование системы контроля форсунок, применяемых в зоне вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок.

Форсунка, зона вторичного охлаждения, экспресс метод контроля, тарировка, теплообмен.

Одним из актуальных направлений исследований в области промышленной теплотехники являются исследования тепловых и теплообменных процессов, протекающих в затвердевающем металле и элементах оборудования технологических машин, например в зоне вторичного охлаждения машин непрерывного литья заготовок (ЗВО МНЛЗ).

До 50 % тепла, отводимого от непрерывно тянувшегося слитка в пределах МНЛЗ, приходится на зону вторичного охлаждения. Тепловые процессы определяют надежность, производительность технологического оборудования и качество получаемых заготовок. Все это диктует выбор рациональной конструк-

ции и оптимальных режимов системы охлаждения затвердевающего металла. Интенсивность и равномерность теплоотвода при охлаждении металла зависит от качества работы установленных форсунок (степени дисперсности распыления жидкости).

Широкое распространение получили системы водяного форсуночного охлаждения ЗВО МНЛЗ. Это обусловлено незначительной стоимостью и низкими энергетическими затратами, а также высокой удельной теплоемкостью воды по сравнению с другими охладителями. На рисунке 1 показан процесс формирования факела диспергированной жидкости при работе плоскофакельной форсунки.

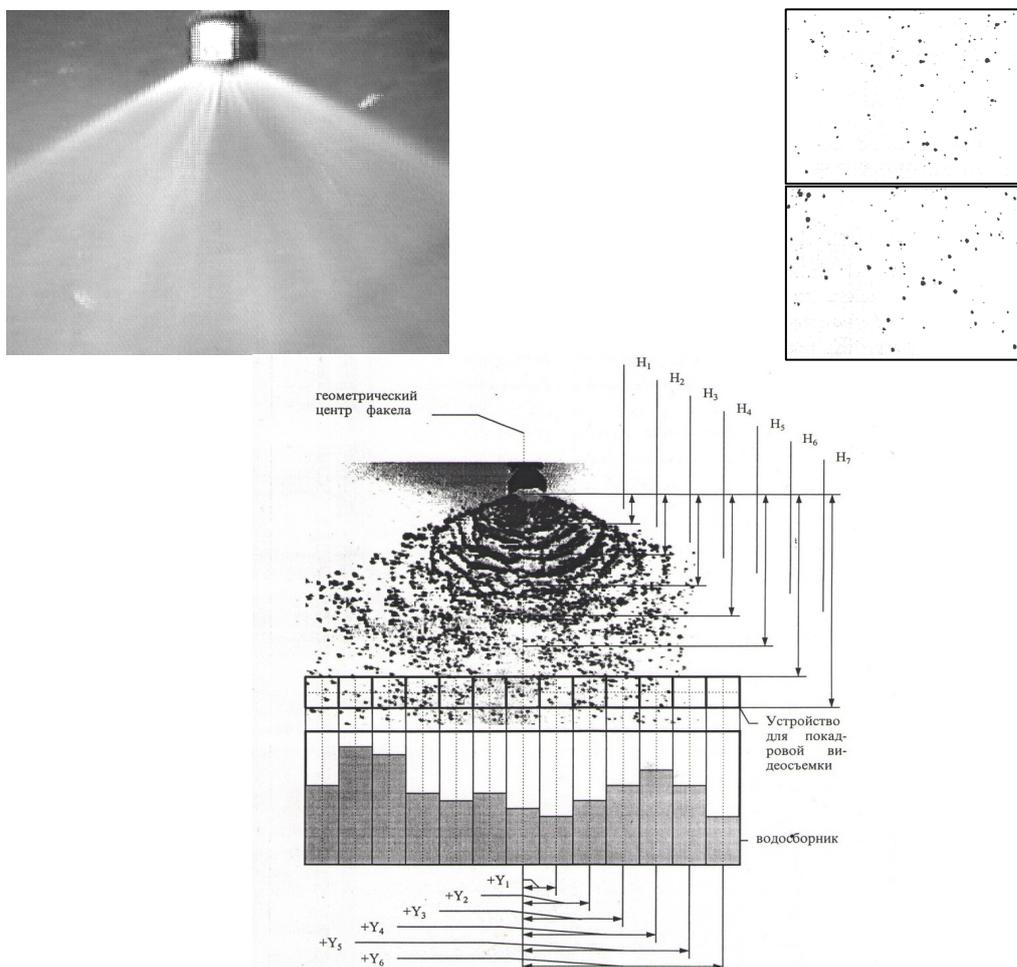


Рис. 1. Факел диспергированной жидкости при работе плоскофакельной форсунки

При обобщении результатов исследований теплообмена при форсуночном охлаждении высокотемпературных поверхностей обнаруживается существенная зависимость интенсивности теплообмена от следующих факторов [2]:

- типов форсунок и их геометрических характеристик (например, площадь выходного отверстия и его конструкция, формирующие соответствующий факел охлаждающей среды);

- режимов охлаждения (давление воды и воздуха перед форсункой, высота установки над поверхностью и т.д.);

- качество работы форсунки (степень диспергированности или мелкость распыления рабочей жидкости).

Все это существенно затрудняет анализ известных данных и их обобщение. Результаты, полученные при исследовании конкретных форсунок, не представляется возможным применить к другим условиям охлаждения, что существенно ограничивает применение известных методик в производственных условиях, для оперативной настройки системы и контроля качества

работы форсунок, прогнозирования качества выпускаемой продукции и повышения надежности эксплуатации оборудования технологических машин.

Для оперативного контроля (экспресс-анализа) диспергирующих свойств форсунок удобным и перспективным является способ, основанный на измерении интенсивности рассеянного света при пропускании луча лазера через факел форсунки (рис. 2). Интенсивность рассеянного света прямо пропорциональна площади поверхности распыленной жидкости, и эту площадь можно рассматривать как обобщенный параметр диспергированности [2].

Для того чтобы использовать метод экспресс-анализа диспергирующих свойств форсунок, необходимо произвести настройку и тарировку измерительной системы [1, 2]. При тарировке определяется коэффициент пропорциональности между амплитудой сигнала, пропорционального интенсивности рассеянного света в данном месте факела, и обобщенным параметром диспергированности в том же месте факела.

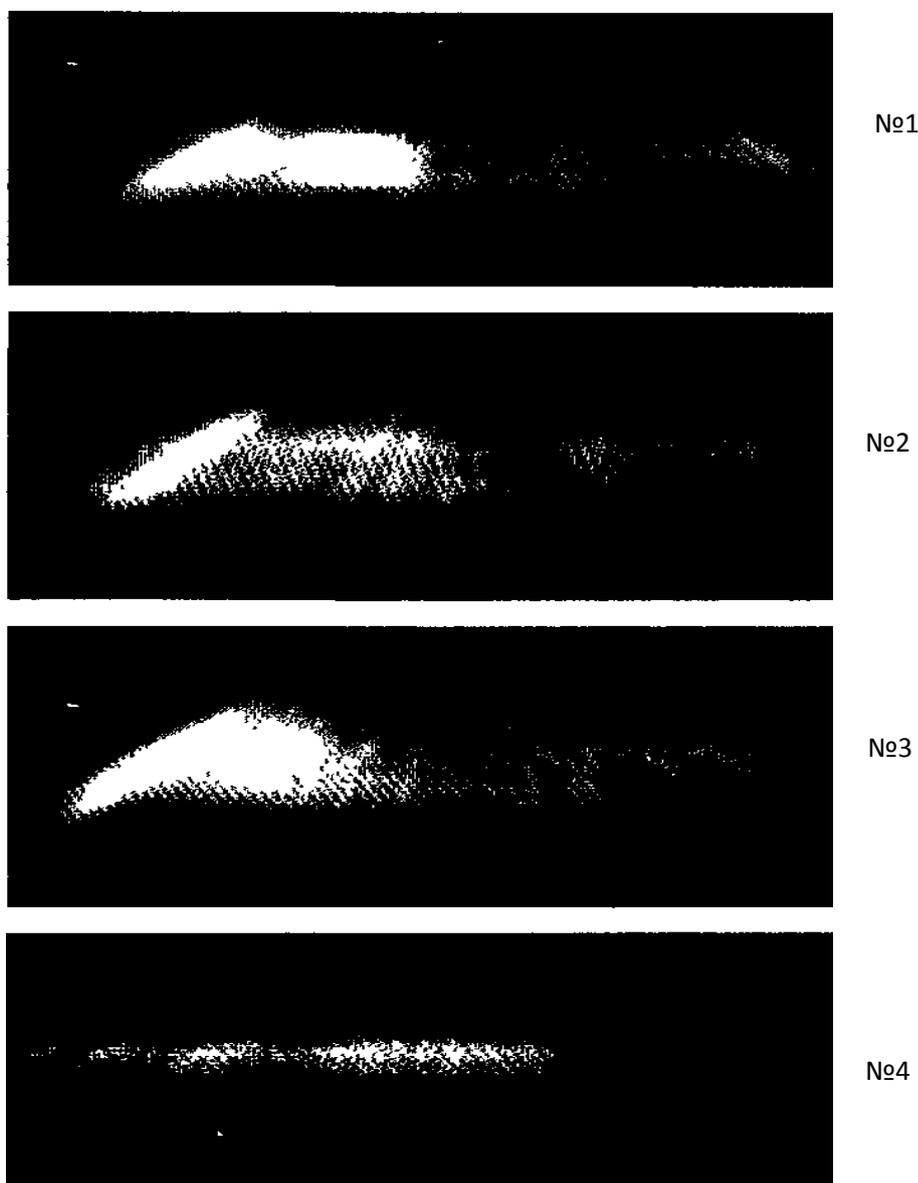


Рис. 2. Свет, рассеянный на каплях диспергированной жидкости

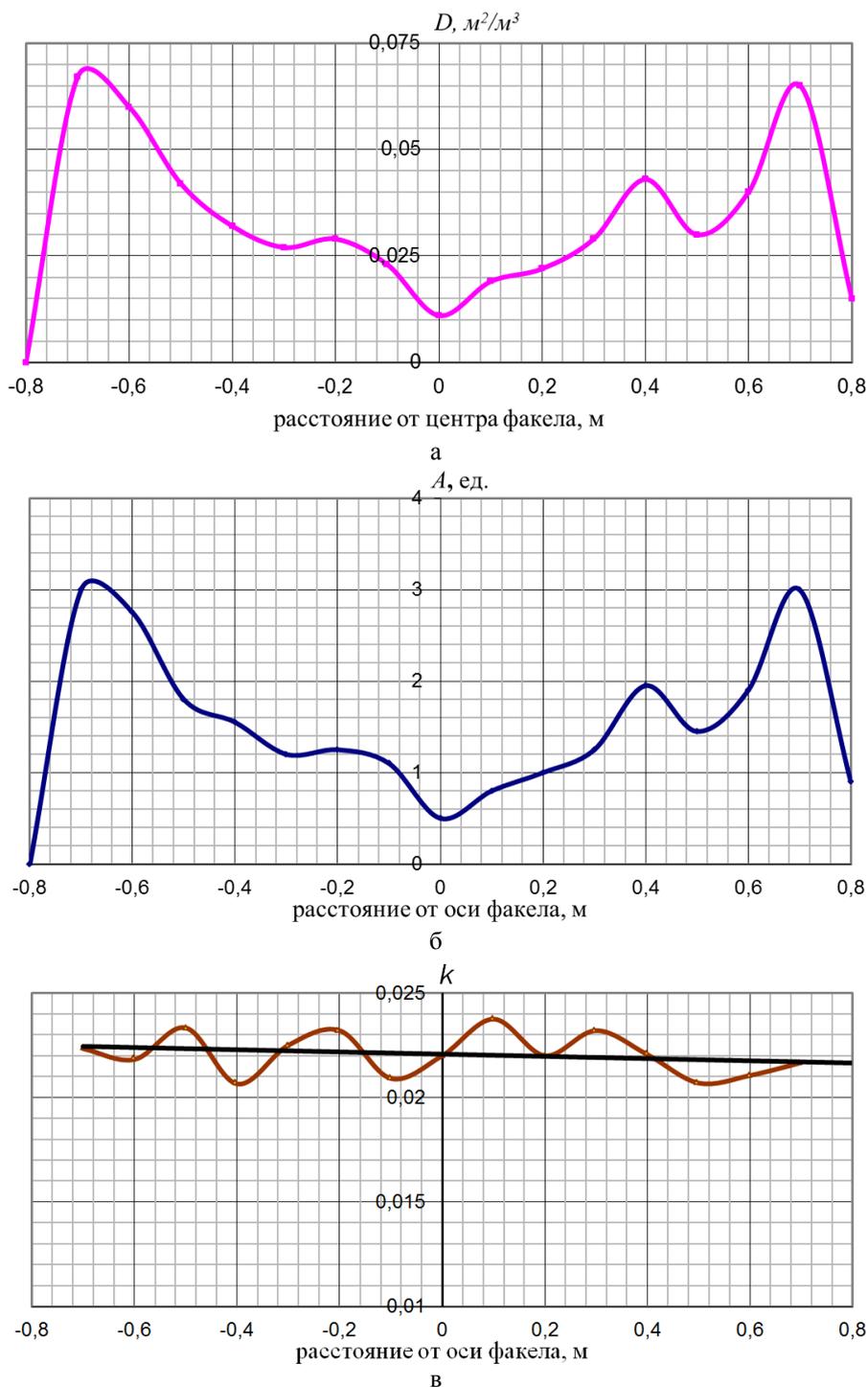


Рис. 3. Тарировка системы: а) распределение обобщенного параметра диспергированности по ширине факела; б) распределение амплитуды сигнала рассеянного света по ширине факела; в) тарировочный коэффициент

Тарировку системы и настройку следует производить с помощью форсунки, диспергирующие свойства которой исследованы независимым способом, например высокоскоростной видеосъемкой [2]. Так, несмещенное изображение летящих капель можно получить, используя режим высокоскоростного затвора видеоустройства при видеосъемке с экспозицией кадра  $1,25 \times 10^{-4}$  с. После того как для тарировочной плоскофакельной форсунки в локальных участках факела на одной и той же высоте определен обобщенный параметр диспергированности капель

$$D = N \cdot R_{32}^2,$$

строится зависимость  $D(\theta)$ , где угол  $\theta$  равен углу между направлением луча лазера и направлением от локального участка факела к приемнику рассеянного света. После этого, на той же высоте факела пропускается луч лазера и производится съемка рассеянного света. Амплитуда сигнала рассеянного света, полученного при компьютерной обработке, также будет зависеть от угла  $\theta$ :  $A(\theta)$ . Следующим шагом рассчитывается тарировочный коэффициент  $k$ :

$$k(\theta) = \frac{D(\theta)}{A(\theta)}.$$

Очевидно, что тарировочный коэффициент  $k(\theta)$  будет зависеть от расстояния между факелом и приемником света, от чувствительности приемника света, а также от компьютерной программы, обрабатывающей видеосигнал.

После определения тарировочного коэффициента применяется метод экспресс-анализа для определения обобщенного параметра диспергированности в любом месте факела произвольной форсунки, подлежащей исследованию. При этом следует сохранять геометрию расположения приемника света, луча лазера и плоскости факела. Луч лазера можно перемещать в плоскости факела, соответственно должен перемещаться приемник света, иначе тарировочный коэффициент изменится. В экспресс-методе факел опытной плоскофакельной форсунки, подлежащей исследованию, просвечивается лучом лазера. Приемник света воспринимает свет, рассеянный каплями жидкости, преобразует его в электрические сигналы, которые изображаются в виде распределения амплитуды сигнала рассеянного света, причем амплитуда характеризуется углом рассеивания  $\theta$ . Далее рассчитывается обобщенный параметр диспергированности в зависимости от угла рассеивания:

$$D(\theta) = k(\theta) \cdot A(\theta).$$

Зная геометрию расположения приемника и факела, легко определить локальный участок факела, соответствующий углу  $\theta$ .

На рисунке 3а показано распределение обобщенного параметра диспергированности  $D$  по ширине факела, полученное способом, изложенным в работах [1, 2]. На рисунке 3б показано распределение амплитуды сигнала рассеянного света по ширине факела, полученное при просвечивании факела на том же уровне лучом лазера. На рисунке 3в показан тарировочный коэффициент, равный отношению  $D$  к  $A$ .

Для оценки коэффициента теплоотдачи на охлаждаемой поверхности можно использовать формулу [3]

$$\alpha = 5200 \cdot N \cdot R_{32}^2 \cdot \frac{G}{F_{\phi} \sqrt{Y^2 + H^2}},$$

где  $G$  – полный объемный расход воды форсунки,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$F_{\phi}$  – площадь отверстия форсунки,  $\text{м}^2$ ;

$H$  – высота от среза сопла до исследуемого сечения (охлаждаемой поверхности),  $\text{м}$ ;

$Y$  – координата от оси факела до точки в исследуемом сечении струи,  $\text{м}$ .

Данная формула является эмпирической, ее вывод основан на том, что интенсивность теплообмена распыленной жидкости с высокотемпературной поверхностью должна быть пропорциональна площади поверхности жидкости, в единицу времени взаимодействующей с высокотемпературной поверхностью.

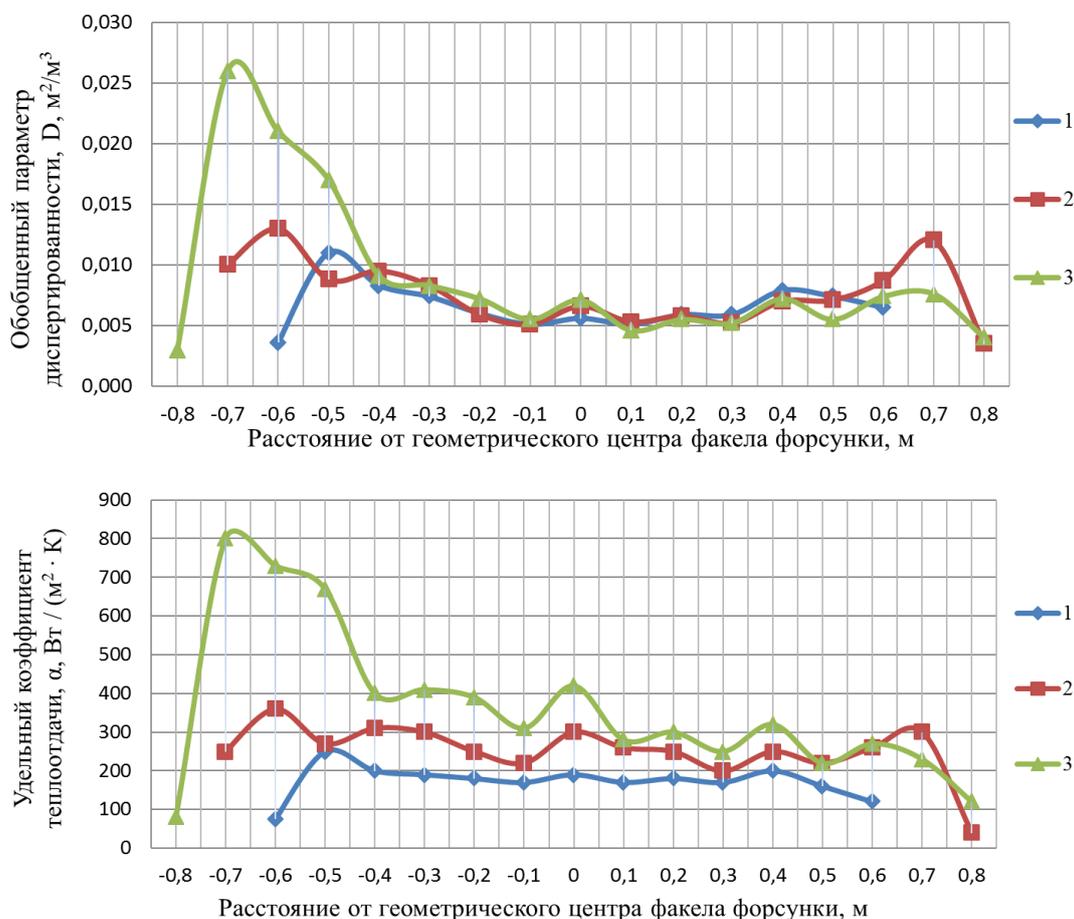


Рис. 4. Распределение обобщенного параметра диспергированности и удельного коэффициента теплоотдачи плоскофакельной форсунки по ширине факела на высоте от поверхности установки 0,45 м (1 – 0,05 МПа, 2 – 0,15 МПа, 3 – 0,25 МПа)

На рисунке 4 показано распределение обобщенного параметра диспергированности и удельного коэффициента теплоотдачи плоскофакельной форсунки по ширине факела на высоте от поверхности установки 0,45 м.

Таким образом, используя изложенный метод экспресс-анализа, можно оперативно оценивать теплообменные характеристики плоскофакельных форсунок.

#### **Литература**

1. Шичков, А. Н. Управление вторичным охлаждением машин непрерывного литья стали / А. Н. Шич-

ков, Н. А. Бормосов, В. П. Белоусова. – DOI: 10.18721/JEST.240209 // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2018. – Т. 24, № 2. – С. 104–118.

2. Калягин, Ю. А. Тепловые процессы в зоне вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок : монография / Ю. А. Калягин, Н. А. Бормосов, С. В. Лукин. – Череповец : ЧГУ, 2005. – 168 с.

3. Методика исследования теплообмена одиночных капель с высокотемпературной поверхностью металла / Ю. А. Калягин, Н. А. Бормосов, С. Ю. Якуничев [и др.] // Вестник Уральского государственного технического университета. – 2003. – № 5. – С. 70–72.

*N.A. Bormosov, V.P. Belousova, A.A. Vtulkin*

#### **EXPRESS-METHOD OF FLAT-PLATE NOZZLES HEAT TRANSFER DETERMINATION**

The article presents the method of operational control of heat exchange characteristics of flat-plate injectors using the effect of light scattering. Calibration of the control system of injectors used in the zone of secondary cooling of the continuous casting machine was performed.

Spray nozzle, the secondary cooling zone, express-method of control, calibration, heat transfer.