



**М.В. Майсурадзе, Ю.В. Юдин**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКАЛОЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ**

Электронное текстовое издание

Подготовлено кафедрой термической обработки и физики металлов

Научный редактор: доц., канд. техн. наук Ю.Г. Эйсмонт

Методические указания к программно-аппаратному лабораторному комплексу для студентов, обучающихся по направлениям 150400 – Metallургия, 150600 – Материаловедение и технология новых материалов и др.

Описано лабораторное оборудование для исследования закалочного охлаждения металлов и сплавов: установка для подачи и измерения расхода жидкости, регистрирующие термозонды, программное обеспечение. Рассмотрены методики экспериментального исследования и обработки полученных результатов

Екатеринбург

2012

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	3
1. Описание лаборатории исследования закалочного охлаждения металлов и сплавов.....	4
2. Описание лабораторного стенда для гидравлических исследований закалочных устройств .....	5
3. Описание термозонда для исследования теплофизических характеристик закалочного охлаждения.....	9
4. Описание компьютерного комплекса для регистрации и обработки результатов экспериментов .....	11
5. Методики обработки результатов исследования закалочного охлаждения	16
5.1. Обработка результатов гидравлических испытаний.....	16
5.2. Обработка результатов теплофизических испытаний .....	17
Заключение.....	20

## ВВЕДЕНИЕ

Закалка стальных изделий является одним из наиболее важных технологических процессов термической обработки, в ходе которого необходимо сформировать комплекс структуры и свойств металла, обеспечивающий требуемый уровень эксплуатационных свойств изделий после дальнейших операций термической, механической и иных обработок.

Решение актуальной задачи оптимизации существующих и создания новых эффективных технологий термообработки стальных изделий невозможно без использования современных, точных и быстродействующих средств контроля процесса охлаждения металла. Особенно это касается сред охлаждения, получаемых посредством диспергирования жидкости в воздушной среде (струйное, водокапельное или водовоздушное охлаждение). Традиционно используемый при измерении интенсивности теплоотдачи метод погружения датчика в закалочную среду для диспергированных сред не подходит вследствие неоднородности распыла, которое приводит к тому, что в разных местах сечения факела распыленной жидкости условия теплообмена будут отличаться. В связи с этим представляется целесообразным разработать программно-аппаратную методику определения охлаждающей способности диспергированных закалочных сред. Это позволит оперативно получать и анализировать экспериментальные данные для конкретного типоразмера охлаждающего устройства, и максимально эффективно использовать данное устройство в практике термической обработки стальных изделий.

Использование данного программно-аппаратного комплекса в учебных целях позволит наглядно продемонстрировать влияние технологических параметров процесса охлаждения на качественные характеристики закалки и осуществить подготовку высококвалифицированных специалистов в области металлургии, материаловедения, термической обработки металлов и сплавов.

## 1. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРИИ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАКАЛОЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Лаборатория исследования закалочного охлаждения металлов и сплавов находится в специально оборудованном помещении Института материаловедения и металлургии (Мт-124). Планировка лаборатории схематично показана на рис. 1.

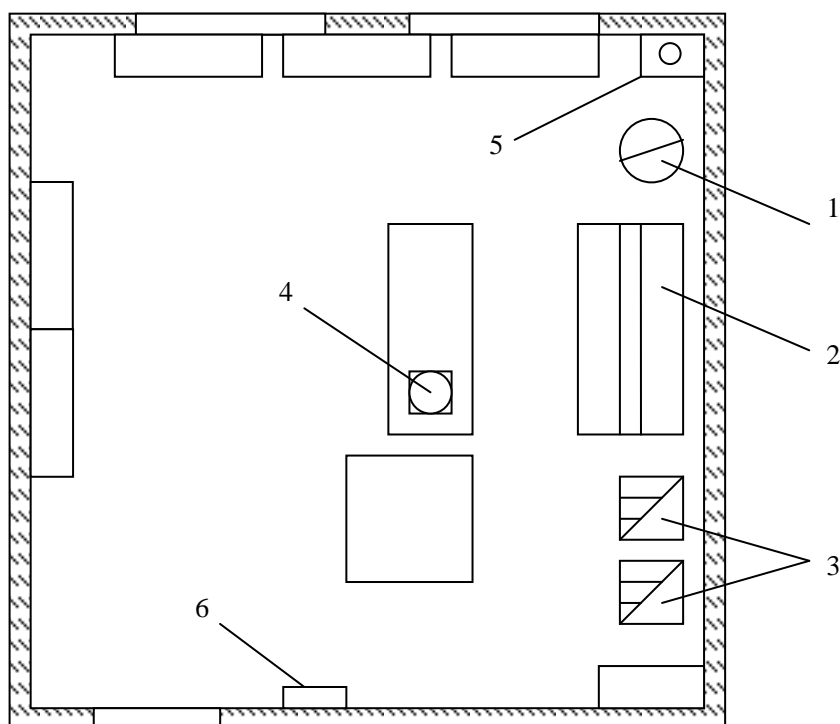


Рис. 1. Планировка лаборатории исследования закалочного охлаждения

В лаборатории имеется специализированный стенд 2 для гидравлических и теплофизических исследований закалочного охлаждения, подвод воды к которому осуществляется при помощи насосов из бака-накопителя 1. Набор воды в бак и слив отработанной воды после закалки производится через точку подключения к водопроводу и канализации 5. Для нагрева металлических образцов используются камерные лабораторные печи 3 типа СНОЛ мощностью до 3 кВт. Исследование особенностей закалочного охлаждения производится при помощи компьютерного комплекса 4, включающего металлический

термозонд с термопарами, семиканальный аналого-цифровой преобразователь и компьютер с установленным специализированным программным обеспечением. Подвод электроэнергии осуществляется через распределительный щиток 6. Кроме того, в лаборатории имеются стеллажи для хранения расходных материалов и сменных элементов стенда, рабочие столы, шкафы и вспомогательное оборудование (аппарат для изготовления термопар, сверлильный станок и т.п.).

Все электрическое оборудование имеет заземление и изолировано от попадания воды из лабораторного стенда при помощи защитных экранов.

## **2. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА ДЛЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗАКАЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ**

Для определения плотности орошения используется специальный лабораторный стенд (рис. 2). Он представляет собой металлическую станину 12, на которой находится коллектор 13 и подвижная планка 6. К планке крепятся раздаточные трубки 14, на которые вертикально устанавливаются форсунки 7. Планка с форсунками может перемещаться в вертикальном направлении на высоту до 1200 мм, а форсунки могут перемещаться по планке в горизонтальном направлении. Это позволяет варьировать относительное расположение форсунок и моделировать различные конструктивные особенности реальных закалочных устройств. Исследование распределения плотности орошения осуществляется с помощью набора емкостей. Пластиковые емкости для сбора воды диаметром 40 мм устанавливаются в сотовом порядке в шестигранную кассету 9 (рис. 3), располагающуюся на поддоне 8. Число емкостей в кассете составляет 61 шт. Высота кассеты – 0,22 м. Орошаемая площадь составляет 0,2 м<sup>2</sup>.

Стенд работает следующим образом. Вода, предварительно набранная в бак-накопитель 1, с помощью насоса 2 по подводным трубам 3 подается в раздающий коллектор 13. По достижении в системе заданного давления

жидкость по патрубкам 5 поступает в форсунки 7. В процессе эксперимента форсунки распыляют воду, которая собирается в мерные емкости. Давление воды в системе регулируется манометром 11.

По окончании эксперимента определяется объем жидкости в каждой емкости с водой. Это позволяет установить распределение плотности орошения по охлаждаемой площади и общий расход воды в единицу времени. Результаты представляются в виде трехмерной поверхности распределения плотности орошения или в виде разрезов этой поверхности вдоль одной из координатных осей (рис. 4).

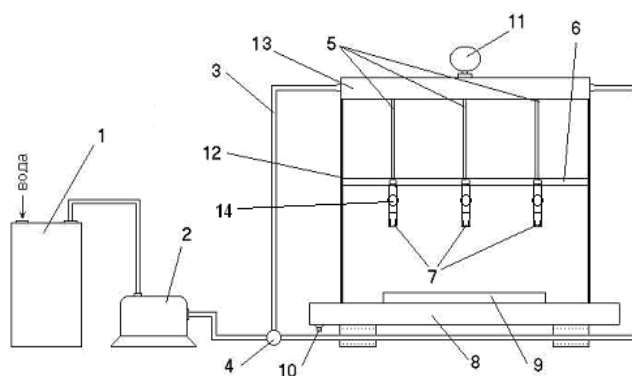


Рис. 2. Схема лабораторной установки

1 – бак-накопитель; 2 – насос; 3 – подводящие трубы; 4 – тройник; 5 – патрубки для подвода воды к форсункам; 6 – подвижная планка; 7 – форсунки; 8 – поддон; 9 – кассета; 10 –слив воды; 11 – манометр; 12 – металлическая станина; 13 – коллектор; 14 – вентиль.

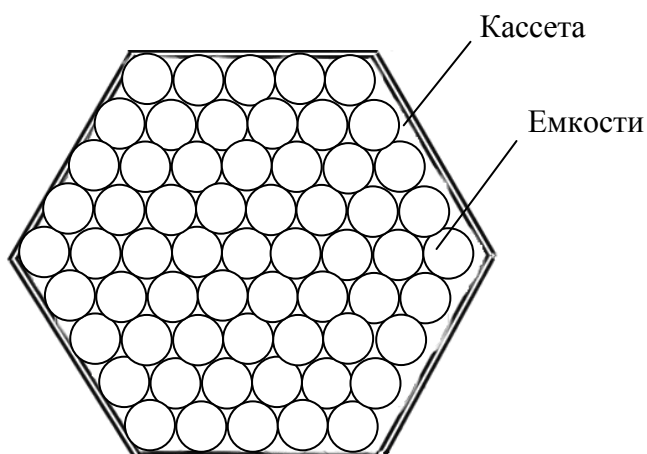
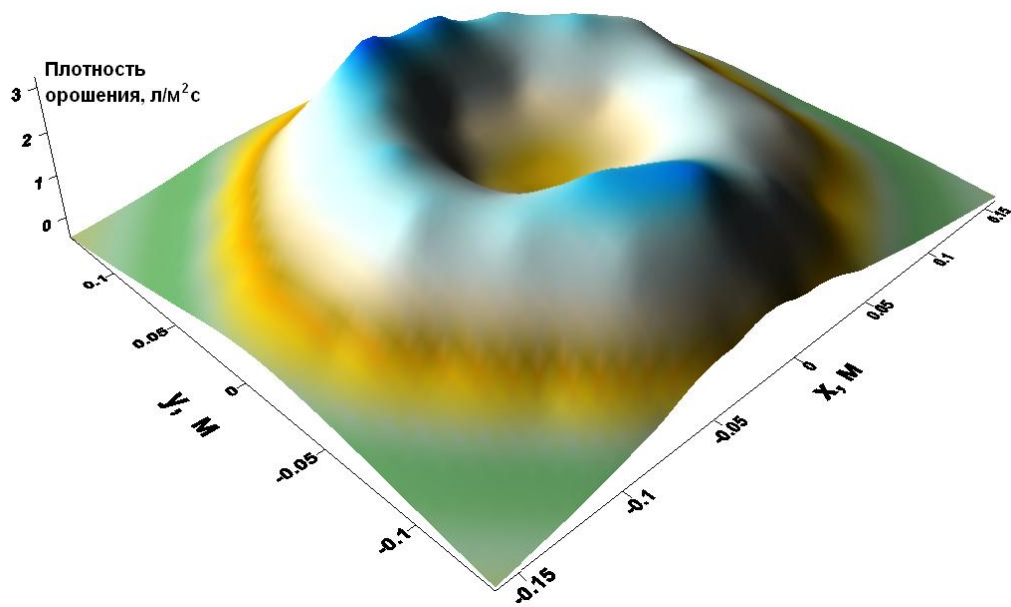
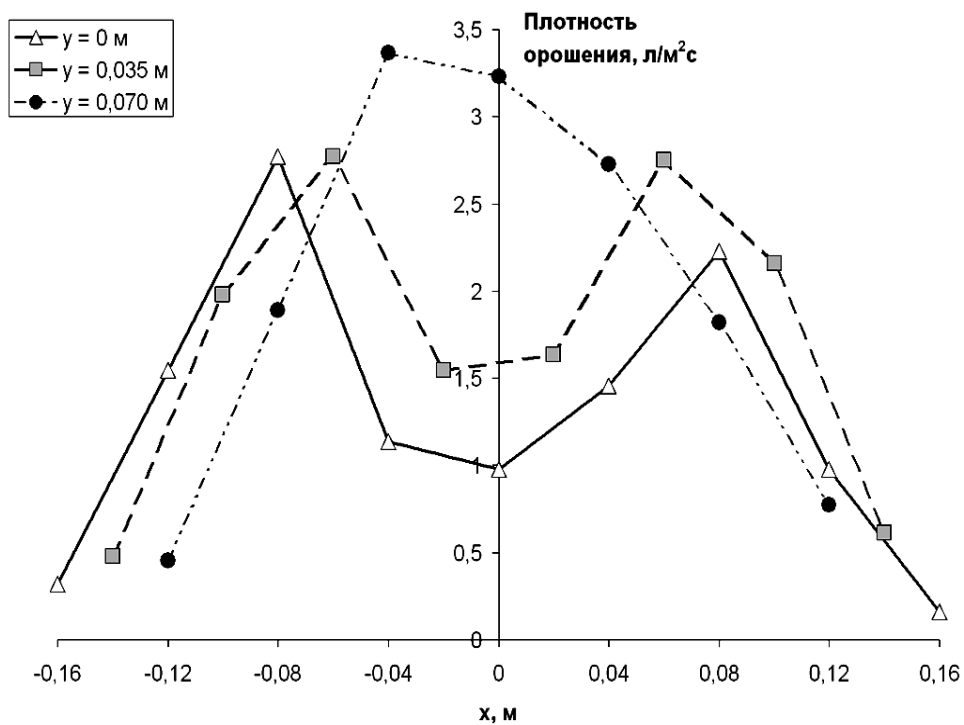


Рис. 3. Схема кассеты с набором емкостей



а)



б)

Рис. 4. Пример распределения плотности орошения центробежно-струйной форсунки при давлении воды 300 кПа:

а) трехмерная поверхность распределения плотности орошения центробежно-струйной форсунки; б) разрезы трехмерной поверхности (а) вдоль оси  $x$  для различных значений  $y$

Лабораторный стенд позволяет моделировать различную пространственную компоновку форсунок в закалочном устройстве. Для этого используются дополнительные модули лабораторного стенда (рис. 5, 6), в которых устанавливаются несколько форсунок одного типоразмера.

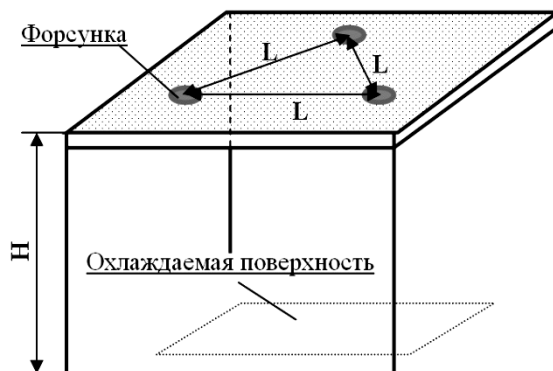


Рис. 5. Дополнительный модуль для исследования гидравлических характеристик водокапельных форсунок

Модуль, схема которого приведена на рис. 5, моделирует работу «элементарной ячейки» охлаждающего устройства: три соседние форсунки, располагающиеся в вершинах равностороннего треугольника со стороной, равной  $L$ . При этом возможно регулировать как расстояние от форсунок до охлаждаемой поверхности ( $H = 0,25\text{--}0,45$  м), так и расстояние между форсунками ( $L = 0,15\text{--}0,25$  м). В ходе эксперимента вода, распыленная тремя одновременно работающими форсунками, собирается в кассету с мерными емкостями (рис. 3).

Модуль, схема которого приведена на рис. 6, предназначен для исследования и моделирования водокапельного охлаждения цилиндрических изделий (труб, прутков и т.п.). Он состоит из тороидального корпуса коробчатого сечения, изготовленного из нержавеющей стали толщиной 1,0–1,5 мм. Наружный диаметр корпуса составляет 360 мм, внутреннее отверстие корпуса имеет диаметр 190–200 мм. На корпусе закрепляются форсунки в количестве 6–14 штук. Расстояние между форсунками можно варьировать в пределах 50–80 мм по окружности модуля. Каждая из форсунок



имеет индивидуальный подвод воды от общего коллектора, стенда. При расположении осей форсунок перпендикулярно охлаждаемой поверхности трубы (прутка) расстояние от сопел форсунок до наружной поверхности закаливаемого изделия может варьироваться в пределах 110–140 мм. Кроме того, модуль позволяет варьировать угол наклона оси форсунок к охлаждаемой поверхности.

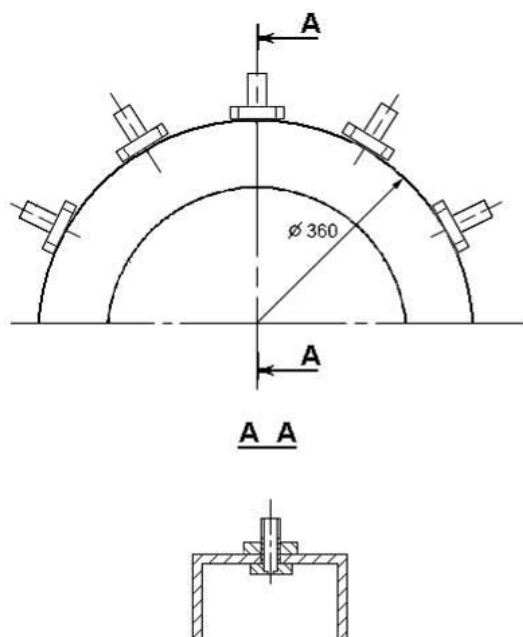


Рис. 6. Дополнительный модуль лабораторного стенда для исследования водокапельной закалки цилиндрических изделий

### **3. ОПИСАНИЕ ТЕРМОЗОНДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАКАЛОЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ**

Определение интенсивности водокапельного охлаждения в лабораторных условиях производится при помощи термозондов различного типа.

Плоский термозонд (рис. 7) представляет собой металлическую пластину толщиной 2–3 мм, размером 150×200 мм, из стали аустенитного класса типа X18H10T, не имеющей фазовых превращений при нагреве и охлаждении. Эскиз термозонда приведен на рис. 7. Для регистрации температуры во время

охлаждения к нижней поверхности пластины приварены термопары типа ХА. Для получения более полной информации об особенностях охлаждения в разных местах по сечению факела распыла количество термопар может составлять до 7 шт. Электроды термопар выводятся через трубку, служащую одновременно рукояткой для переноса термозонда из печи в лабораторную установку. С одной стороны пластина теплоизолирована для того, чтобы тепловой поток при охлаждении был направлен только в одну сторону.

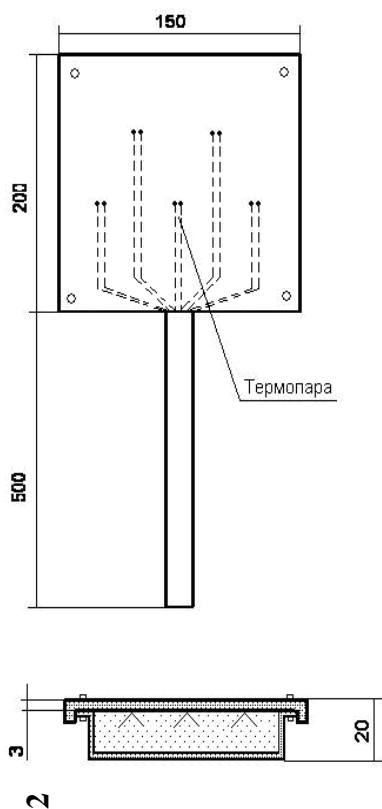


Рис. 7. Плоский термозонд

Для исследования охлаждения цилиндрических изделий используется термозонд, представляющий собой сектор с поверхностью  $60 \times 60$  мм, изготовленный из трубы диаметром 100 мм с толщиной стенки 10 мм из стали марки Х18Н10Т (рис. 8). Данный термозонд имеет две термопары типа ХА, заглубленные на расстояние 2 и 6 мм соответственно от охлаждаемой поверхности. Вторая термопара нужна для дублирования эксперимента и расчета коэффициента теплоотдачи путем решения обратной задачи

теплопроводности. Электроды термопар выведены через трубку, служащую одновременно рукояткой для переноса термозонда из печи в лабораторную установку.

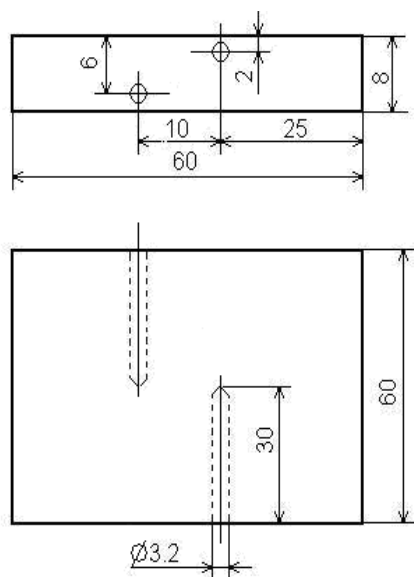


Рис. 8 Эскиз термозонда в виде сектора трубы

Нагрев термозонда до требуемой температуры производится в камерной лабораторной печи СНОЛ. По достижении термозондом заданной температуры он переносится из печи в лабораторную установку, где охлаждается до температуры ниже 100 °С. Время переноса термозонда из печи к установке должно составлять не более 5 с.

#### **4. ОПИСАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ**

Используемый в лаборатории компьютерный комплекс состоит из аналого-цифрового преобразователя (АЦП) I-7017F, переходника I-7520 и персонального компьютера со специализированным программным обеспечением.

Общий вид аналого-цифрового преобразователя приведен на рис. 9. Основные характеристики:

- количество входных каналов: 6 дифференциальных + 2 несимметричных или 8 дифференциальных (выбирается переключкой JP1);
- тип входного сигнала: мВ, В, мА;
- входные диапазоны:  $\pm 150$  мВ,  $\pm 500$  мВ,  $\pm 1$ В,  $\pm 5$ В,  $\pm 10$ В,  $\pm 20$ мА (с внешним резистором);
- частота замеров: 10 замеров в секунду для каждого канала (10 Гц);
- точность:  $\pm 0,1$  %;
- потребление энергии: 2 Вт.

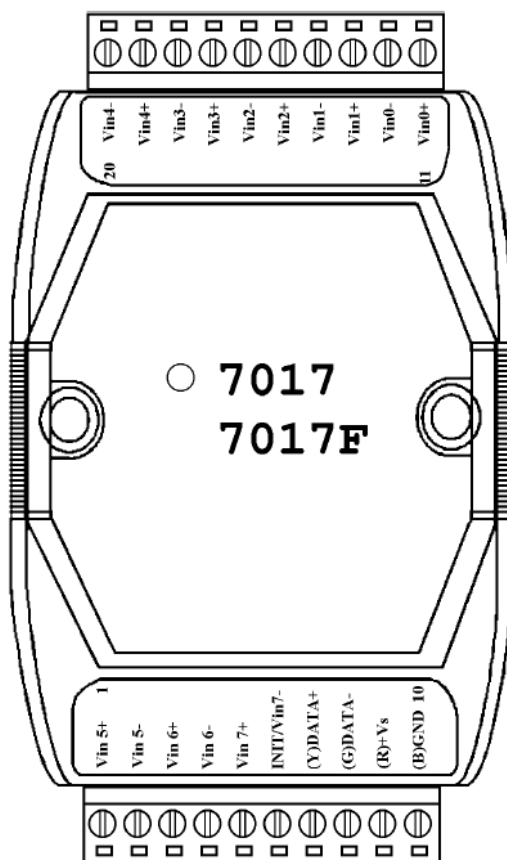


Рис. 9. Аналого-цифровой преобразователь I-7017F

Электроды термопар, приваренных к термозонду, через соединительные провода подключаются к входным каналам АЦП. АЦП регистрирует термоЭДС каждой подключенной термопары с частотой 10 Гц и при помощи встроенного контроллера передает цифровую информацию в реальном времени на жесткий диск компьютера посредством переходника RS-232 / RS-485 (I-7520) через порт COM или USB.

Управление режимом работы АЦП (изменение частоты опроса каналов, изменение количества опрашиваемых каналов, ввод дополнительных команд, поверка и т.д.), а также запись показаний термопар производятся при помощи специализированной программы «DCON Utility», рабочее окно которой приведено на рис. 10.

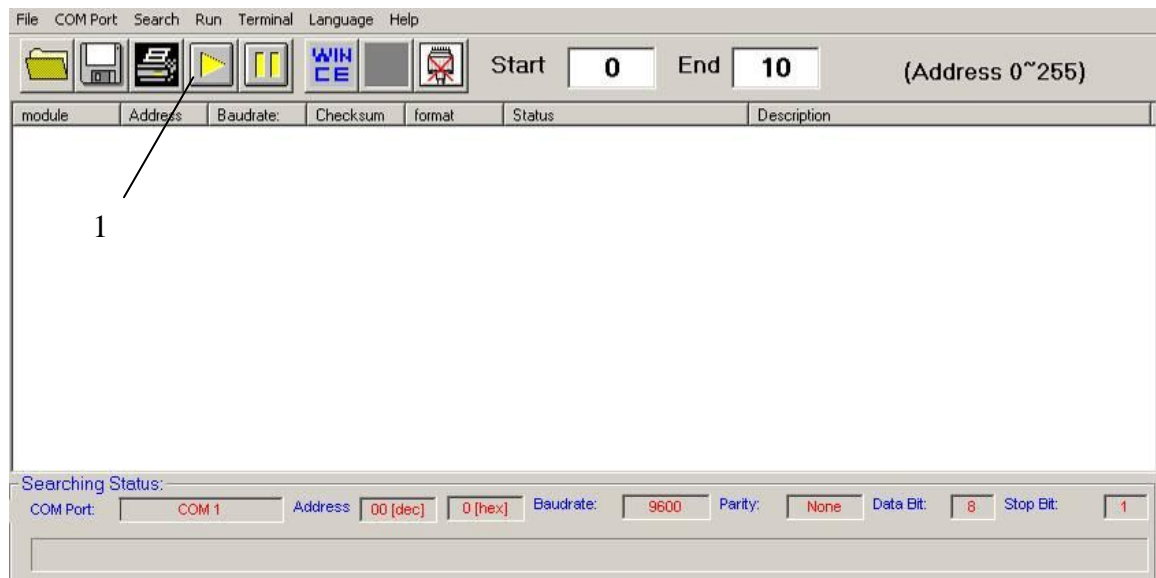


Рис. 10. Рабочее окно программы «DCON Utility»

Перед началом работы программе требуется произвести опрос всех портов компьютера с целью определения подключенных АЦП. Для этого на панели управления рабочего окна программы предусмотрена кнопка 1 (рис. 10). Все подключенные к компьютеру аналого-цифровые преобразователи отобразятся в рабочем окне программы, как показано на рис. 11.

Программа может работать в двух режимах: в режиме мониторинга и в режиме записи. Выбор нужного режима работы производится через элемент меню «Run» (рис. 12).

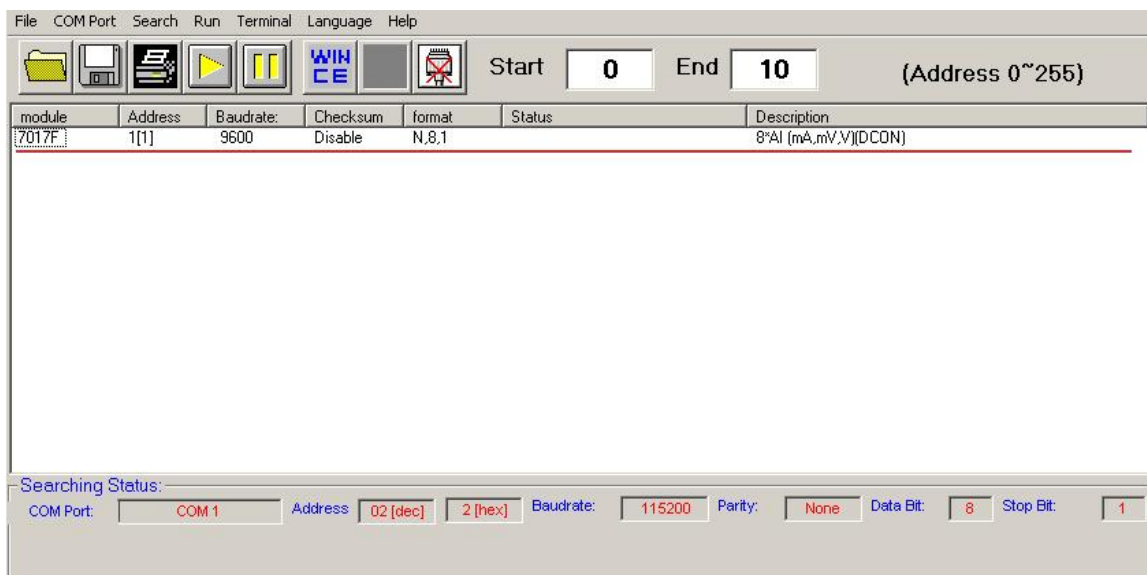


Рис. 11. Отображение подключенных АЦП в рабочем окне программы «DCON Utility»

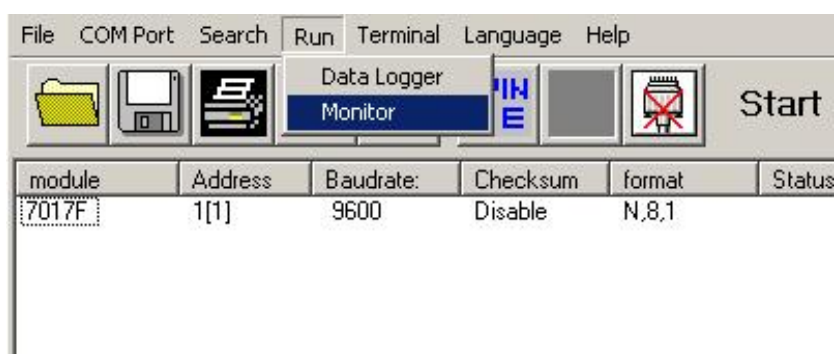


Рис. 12. Выбор режима работы программы

Выбор режима «Monitor» целесообразен, если не требуется производить запись показаний термопар – например, в случае регулирования температуры нагревательной печи или для проверки работоспособности термозонда. В этом случае откроется окно, в котором будут отображаться в реальном времени показания термопар в милливольтках (рис. 13).

Для записи показаний термопар в файл необходимо выбрать режим работы «Data logger». В этом случае откроется окно (рис. 14), которое позволяет выбрать файл, в который будет производиться запись (кнопки 1), а также просмотреть параметры работы АЦП и внести необходимые коррективы (кнопки 2).

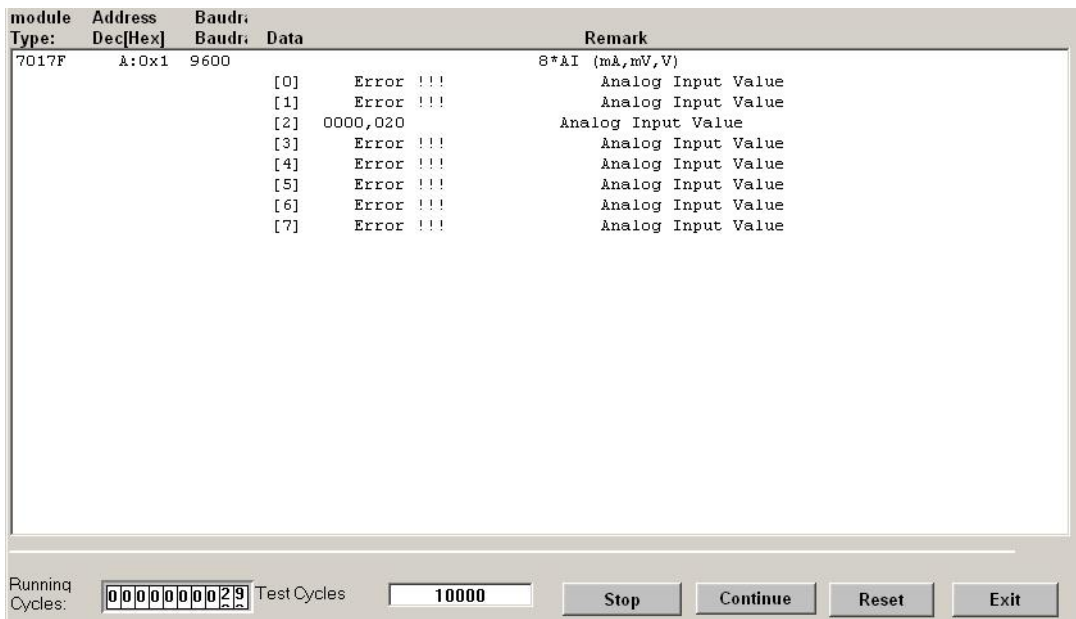


Рис. 13. Окно программы «DCON Utility» при работе в режиме мониторинга

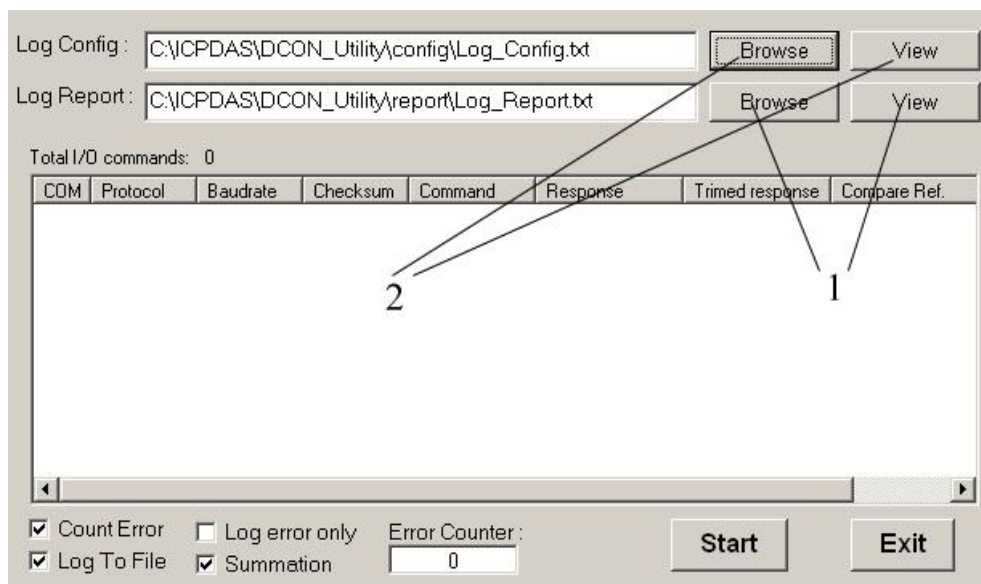


Рис. 14. Окно программы «DCON Utility» при работе в режиме записи

Кнопка «Start» служит для запуска процесса записи показаний термопар в выбранный ранее файл. Для выхода из режима записи используется кнопка «Exit».

Данные, передаваемые АЦП, сохраняются в текстовом формате на жестком диске компьютера. Для дальнейшей обработки результатов экспериментов используются специализированные математические и статистические пакеты программного обеспечения.

## 5. МЕТОДИКИ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАКАЛОЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

### 5.1. Обработка результатов гидравлических испытаний

Плотность орошения определяется следующим образом:

$$Q_i = \frac{M_i}{S_i \tau_p}, \text{ л/м}^2\text{с} \quad (1)$$

где  $Q$  – плотность орошения в  $i$ -й емкости кассеты, л/м<sup>2</sup>с;  $M_i$  – объем воды в  $i$ -й емкости кассеты, л;  $S_i$  – площадь поперечного сечения емкости;  $\tau_p$  – время, в течение которого производился распыл, с.

Для каждой емкости определяют ее положение в системе координат и составляют таблицу эксперимента (табл. 1). По полученным данным можно построить графики распределения плотности орошения по поверхности, определить среднее значение плотности орошения и установить ее стандартное отклонение для конкретного типоразмера форсунки.

Таблица 1

Результаты эксперимента

Параметры форсунки	Давление воды, кПа	Расстояние от сопла до кассеты, м	Время распыливания, с
...	...	...	...
x, м	y, м	$Q$ , л/м <sup>2</sup> с	
...	...	...	

Среднеквадратичное отклонение плотности орошения в данной точке распыла рассчитывается относительно ближайших соседних точек по следующей формуле:

$$s_Q = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}, \quad (2)$$

где  $s_Q$  – стандартное отклонение плотности орошения, л/м<sup>2</sup>с;  $n$  – количество ближайших соседних точек, включая расчетную;  $Q_i$  – значение плотности



орошения в  $i$ -й соседней точке, л/м<sup>2</sup>с;  $\bar{Q}$  – среднее значение плотности орошения в ближайших соседних точках, л/м<sup>2</sup>с. Схема к расчету стандартного отклонения плотности орошения приведена на рис. 15.

Интегральной величиной, характеризующей равномерность распределения плотности орошения для конкретной конфигурации форсунки, является среднее арифметическое значение стандартного отклонения всех расчетных точек.

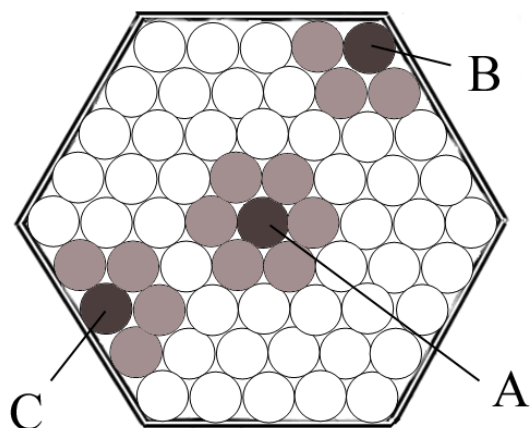


Рис. 15. Схема к расчету стандартного отклонения плотности орошения:

■ – расчетная точка; ■ – ближайшие соседние точки; А – расчетная точка расположена внутри кассеты,  $n = 7$ ; В – расчетная точка расположена в углу кассеты,  $n = 4$ ; С – расчетная точка расположена на стороне кассеты,  $n = 5$

## 5.2. Обработка результатов теплофизических испытаний

Порядок обработки результатов эксперимента и расчета температурной зависимости коэффициента теплоотдачи можно производить в программной среде *Microsoft Excel*, а также в таких пакетах программ, как *Origin*, *Open Office*, *MathCAD* и др.

Цифровой сигнал с каждой термопары пересчитывается из милливольт в градусы Цельсия по формуле:

$$t = \frac{V + 1,0924}{0,042}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (3)$$

где  $t$  – температура,  $^\circ\text{C}$ ;  $V$  – показания термопары, мВ.

Далее, используя метод численного дифференцирования, определяется скорость охлаждения в каждый момент времени для каждой термопары:

$$V_{охл} = \frac{t_2 - t_1}{\tau_2 - \tau_1}, \text{ } ^\circ\text{C}/\text{c}, \quad (4)$$

где  $t_1$  и  $t_2$  – значения температуры в момент времени  $\tau_1$  и  $\tau_2$  соответственно,  $^\circ\text{C}$ .

Затем рассчитывается коэффициент теплоотдачи для каждого момента времени и строятся кривые зависимости коэффициента теплоотдачи от температуры поверхности термозонда. Расчет коэффициента теплоотдачи производится по формуле

$$\alpha = \frac{c \cdot \rho \cdot \delta \cdot V_{охл}}{t - t_c}, \text{ Вт}/\text{м}^2\text{К}, \quad (5)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ ;  $c$  – удельная теплоемкость охлаждаемого металла,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $\rho$  – плотность стали,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\delta$  – расстояние от поверхности термозонда до горячего спая термопары, м;  $V_{охл}$  – скорость охлаждения в данный момент времени,  $^\circ\text{C}/\text{c}$ ;  $t$  – температура металла в данный момент времени,  $^\circ\text{C}$ ;  $t_c$  – температура охлаждающей среды,  $^\circ\text{C}$ .

Экспериментально определив температурные зависимости коэффициента теплоотдачи в нескольких точках поверхности термозонда, можно установить соответствие интенсивности охлаждения и плотности орошения в этих точках. Для этого вводится понятие *среднеинтегрального* коэффициента теплоотдачи, который определяется следующим образом:

$$\alpha_{\text{с-инт}} = \frac{\int_{t_{\max}}^{t_{\min}} \alpha(t) dt}{t_{\max} - t_{\min}}, \text{ Вт}/\text{м}^2\text{К}, \quad (6)$$

где  $\alpha_{\text{с-инт}}$  – среднеинтегральный коэффициент теплоотдачи,  $\text{Вт}/\text{м}^2\text{К}$ ;  $\int_{t_{\max}}^{t_{\min}} \alpha(t) dt$  – площадь под графиком зависимости коэффициента теплоотдачи от

температуры термозонда (рис. 16);  $t_{\min}$  и  $t_{\max}$  – границы температурного интервала определения среднеинтегрального коэффициента теплоотдачи, °С.

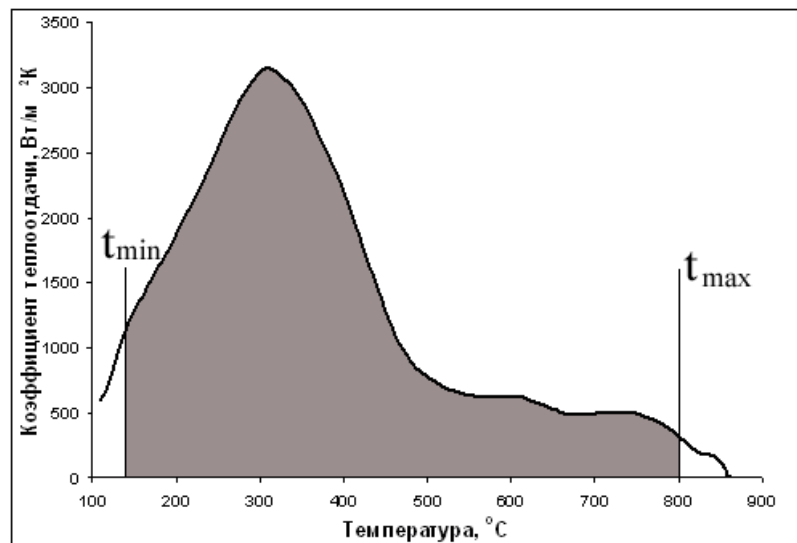


Рис. 16. Расчет интегрального коэффициента теплоотдачи

Таким образом, зная распределение плотности орошения по охлаждаемой поверхности и значения среднеинтегрального коэффициента теплоотдачи в нескольких точках поверхности термозонда, можно определить зависимость  $\alpha_{с-инт}$  от  $Q$ . Для этого необходимо при проведении эксперимента позиционировать термозонд строго в определенном положении, а затем соотнести координаты местоположения спаев термопар с координатами распределения плотности орошения по поверхности.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Разработанный программно-аппаратный лабораторный комплекс позволяет производить детальное исследование основных гидравлических и теплофизических характеристик закалочных устройств, использующих в качестве охлаждающей среды диспергированную жидкость.

Лабораторный комплекс представляет большой интерес с точки зрения учебного процесса, т.к. дает возможность студентам ознакомиться и изучить на лабораторных занятиях взаимосвязь характеристик работы закалочных устройств с их технологическими параметрами. Кроме того, результаты, полученные при помощи данного комплекса, могут быть использованы при разработке технологии термической обработки и конструкций закалочных устройств в рамках проводимых университетом научно-исследовательских работ.

Учебное электронное текстовое издание

Майсурадзе Михаил Васильевич

Юдин Юрий Вячеславович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКАЛОЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ  
МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ**

**Редактор**  
**Компьютерная верстка**

*Н.В. Лутова*  
*авторская*

Рекомендовано Методическим советом  
Разрешено к публикации 10.12.12  
Электронный формат – pdf  
Объем 1,01 уч.-изд.л.



620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19

Информационный портал УрФУ  
<http://www.ustu.ru>