

УДК 621.577

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОГРАММЫ IQLAB ПРИ РЕШЕНИИ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ДЛЯ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТЕРМОЗОНДОВ

Зотов Е.Н.¹, канд.техн.наук, Москаленко А.А.¹, канд.техн.наук, Разумцева О.В.¹, Проценко Л.Н.¹, Добри́вечер В.В.²

¹ Институт технической теплофизики НАН Украины, ул. Желябова, 2а, Киев, 03680, Украина

² ООО «Интенсивные технологии ЛТД», пр-т Победы, 68/1, Киев, 03113, Украина

<https://doi.org/10.31472/ihe.3.2018.12>

Представлені експериментально-розрахункові дослідження результатів використання програми IQLab для розв'язання зворотної задачі теплопровідності і відновлення температури поверхні циліндричних хромо-нікелевих зразків (термозондів) при їх охолодженні в рідких середовищах. Експерименти проведені на зразках $D = 10...50$ мм в рідинах з різною охолоджуючою здатністю. Для розрахунку використовувалися показання термопар, встановлених у внутрішніх точках циліндричних термозондів.

Представлено експериментально-расчетное исследование результатов использования программы IQLab для решения обратной задачи теплопроводности и восстановления температуры поверхности цилиндрических хромо-никелевых образцов (термозондов) при их охлаждении в жидких средах. Эксперименты проведены на образцах $D = 10...50$ мм в жидкостях с различной охлаждающей способностью. Для расчета использовались показания термопар, установленных во внутренних точках цилиндрических термозондов.

An experimental and computational study of the results of using the IQLab program to solve inverse heat conduction problem and restore the temperature of the surface of cylindrical chromium-nickel samples (thermal probes) during their cooling in liquid media is presented. The experiments were performed on samples $D = 10...50$ mm in liquids with different cooling capacities. For the calculation we used the readings of thermocouples installed at internal points of cylindrical thermosondes.

Библ. 8, рис. 4, табл.1.

Ключевые слова: определение охлаждающей способности жидкости, термозонд, прямая и обратная задачи теплопроводности, программа IQLab.

Условные обозначения:

D – диаметр, мм;
 H – высота, мм;
 T – температура, °C;
 Δ – разность;
 τ – время, сек;

Нижние индексы:

ОЗТ – обратная задача теплопроводности;
 ПЗТ – прямая задача теплопроводности;

ПО – программное обеспечение;

ТЗ – термозонд;

ТП – термопара;

э – экспериментальная;

ж – жидкость;

р – расчетная;

п.в. – восстановленная температура поверхности;

ц.э. – экспериментальная температура центра;

ц.р. – расчетная температура центра.

Введение

Эффективность технологических процессов термообработки стальных деталей зависит от охлаждающей способности закалочной среды. Для унификации исследований этой характеристики были разработаны международные (ISO 9950) [1, 2] и национальные (США, Японии, Франции, Китая) [3] методические стандарты. В стандартах в качестве измерительных образцов используются серебряные и хромо-никелевые термозонды (ТЗ) цилиндрической формы. Процесс охлаждения ТЗ в закалочной среде контролируется установленной в геометрическом центре образца хромель-алюмелевой термопарой (ТП).

Для многоразового лабораторного тестирования закалочных сред, а также для использования результатов этих тестов в промышленных условиях, более практич-

ными являются термозонды из хромо-никелевых сплавов. Стандартные ТЗ изготавливаются из хромо-никелевого сплава Inkonel 600 (Ni – 72,0%; Cr – 14...17%, близкие аналоги – сплавы ХН78Т, ХН60ВТ). Хромо-никелевые сплавы сочетают высокую жаростойкость, коррозионную устойчивость и технологичность при механической обработке. Теплофизические свойства таких сплавов близки к свойствам марок сталей, распространенных в технологиях термообработки.

Применение таких компактных термозондов с диаметром от 10 до 16 мм с одной центральной термопарой вызывает у некоторых исследователей возражения по обоснованности их использования для расчетов температурных режимов охлаждения более габаритных образцов и реальных деталей. Такие ТЗ предлагается использовать лишь для тестирования при сравнении

охлаждающих способностей различных жидкостей по графикам температуры и скорости охлаждения.

В работе [4], с целью повышения точности и прикладного значения результатов расчетов характеристик теплообмена на поверхности ТЗ, предложено использовать цилиндрические термозонды с увеличенным диаметром (25 мм; 50 мм; 80 мм) и установкой 2-3 термопар в контрольных точках.

При сравнении процессов охлаждения компактных термозондов и ТЗ с большими размерами ($D = 25 \dots 80$ мм) и массой, авторами [6] установлено следующие различия:

- по продолжительности охлаждения: стандартный термозонд диаметром 12 мм охлаждается от 850°C до 200°C от 20 до 25 секунд, а цилиндрический термозонд с диаметром 50мм – в 25...30 раз медленнее, от 500 до 600 секунд;

- продолжительность охлаждения стандартных компактных термозондов недостаточна для точной регистрации и детального анализа перемещения границы зон пузырькового и пленочного кипения по высоте ТЗ. Для этого лучше использовать цилиндры, имеющие большие диаметры и высоту;

- интенсивность теплоотдачи при пузырьковом кипении тем выше, чем меньше диаметр ТЗ, особенно существенно это различие проявляется для термозондов от 10 до 25 мм;

- стандартные компактные ТЗ имеют небольшой объем и относительно большую площадь поверхности. Вследствие этого, на начальном этапе они охлаждаются так быстро, что начальный тепловой поток, как правило, больше, чем первая критическая плотность теплового потока ($q_{кр1}$). Это объясняет возникновение режима пленочного кипения на начальном этапе в большинстве экспериментов, что значительно реже происходит в случае с габаритными ТЗ и реальными деталями;

В предыдущей статье авторов [4] рассматривались различные методы определения плотности тепловых потоков и коэффициентов теплоотдачи на поверхности серебряных термозондов сферической и цилиндрической формы, охлаждаемых в различных жидкостях.

Постановка задачи

Целью данной работы является проверка корректности работы программы IQLab [5, 6, 7] при восстановлении температуры на поверхности цилиндрических термозондов из жаропрочных хромоникелевых сплавов различных геометрических размеров с 1 - 3 термопарами.

Входными данными при решении обратной задачи теплопроводности по восстановлению температуры поверхности ТЗ являются экспериментальные значения температуры в точках внутри образца. Эксперименты по диагностике процесса охлаждения проводились на термозондах с геометрией D/H : 10/50 мм, 12/60 мм,

25/100 мм, с одной центральной термопарой, 50/200 мм с тремя термопарами (центральной, поверхностной и на глубине 5 мм от поверхности). Установка трех ТП на термозонде $D/H = 50/200$ мм диктовалась необходимостью установки термопары на поверхности и ТП, установленной на глубине 5 мм от поверхности, для подтверждения точности восстановления температуры поверхности по $T_{ц}$ при решении ОЗТ. Температура ТЗ в экспериментах измерялась с помощью контрольных хромель-алюмелевых термопар с диаметром электродов 0,3 мм. Класс термопары обеспечивал паспортную точность измерения в диапазоне рабочих температур 810...100°C не хуже, чем $\pm (0,3 + 0,005T_{ТЗ})$ °C. Установка ТП внутри ТЗ производилась в соответствии с рекомендациями стандарта ISO 9950. Для обеспечения надежного теплового контакта, зазор между спаем ТП и металлом отверстия в термозонде заполнялся медно-никелевым припоем с температурой плавления от 850 до 910 °C.

Были исследованы жидкости, обладающие различными охлаждающими способностями: водные растворы NaCl и полимера Юкон-Е, растительное рапсовое масло и минеральное масло И-20А. Эксперименты проведены в лаборатории ИТТФ НАНУ на установке для тестирования охлаждающих свойств закалочных сред. Установка представляет собой аппаратно-программный комплекс, состоящий из нагревательной печи, блока управления нагревом ТЗ, позволяющего нагреть ТЗ до установленной температуры, блока 8-канального аналого-цифрового преобразования сигнала термопар со скоростью до 10 измерений в секунду и компьютера со специальным программным обеспечением (ПО). ПО содержит программу регистрации температуры термозонда при его охлаждении в исследуемой жидкости и программу IQLab для обработки массива температурных данных и представления результатов в графической и табличной форме.

Программа IQLab предназначена также для решения одномерных нелинейных прямых (ПЗТ) и обратных задач теплопроводности (ОЗТ) при постоянных начальных и граничных условиях, задаваемых как функция времени в табличном виде с постоянным и переменным шагом по времени. Для решения уравнения теплопроводности используется конечно-разностный метод.

Для решения ОЗТ задаются форма образца, свойства материала (в IQLab имеется библиотека теплофизических свойств различных марок сталей и сплавов – X18H9T, Inconel 600 и др.), координата точки сбора экспериментальных данных. Программа автоматически выбирает оптимальные (по точности и экономии машинного времени) шаг по времени и число разбиений на отрезке пространственной координаты, число узлов на отрезке времени охлаждения образца и значение параметра регуляризации, обеспечивающих решение ОЗТ.

Описание решения ОЗТ

Процесс решения ОЗТ является итерационным. После выполнения итерации, решение ОЗТ представляется в виде восстановленной температуры поверхности и расчетной температуры в любой точке внутри образца в интервале времени его охлаждения. Результаты представлены в графическом и в табличном виде.

В процессе решения ОЗТ точность оценивается средне-интегральной ошибкой [8]:

$$F = \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{[T_{pi}(\tau) - T_{zi}(\tau)]^2}{m}}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1)$$

Данная ошибка используется для нахождения оптимального решения при решении обратной задачи для конкретного эксперимента.

Для визуальной оценки также рассчитывается и выводится в соответствующем окне еще одна ошибка, которая рассчитывается, как максимальная разность между экспериментальной ($T_э$) и расчетной ($T_р$) температурой в точке сбора опытных данных:

$$\Delta T = \max |T_р(\tau) - T_э(\tau)|. \quad (2)$$

Поскольку при исследовании процессов охлаждения наибольшие расхождения происходят в основном в начальный промежуток времени, а в остальной, как правило, намного большей части расхождения пренебрежимо малы, то именно последняя формула ошибки дает хорошую сравнительную оценку качества решения обратных задач для различных экспериментов. Первая же формула ошибки дает характеристику, которая оценивает качество приближения в рамках одной и той же задачи для одного эксперимента.

В процессе решения ОЗТ после очередной итерации возможно изменение числа узлов и значения параметра регуляризации. Увеличение числа узлов повышает точность решения ОЗТ, т.е. уменьшает ΔT , а увеличение значения параметра регуляризации улучшает монотонность, повышает устойчивость решения ОЗТ, но увеличивает ΔT . Процесс решения можно остановить, когда ΔT становится достаточно малым (например, сравнимым с экспериментальной погрешностью) или когда ΔT не уменьшается с увеличением числа итераций.

Ниже представлены результаты решения ОЗТ по восстановлению температуры поверхности для исследуемых термозондов.

Результаты восстановления температуры поверхности $T_{п.в.}$ для различных размеров хромоникелевых ТЗ, охлаждаемых в жидкостях, представлены в таблице 1.

Обсуждение

В результате проведенного экспериментального исследования охлаждения ТЗ $D = 10 \dots 50$ мм в различных жидких средах и применения программы IQLab для

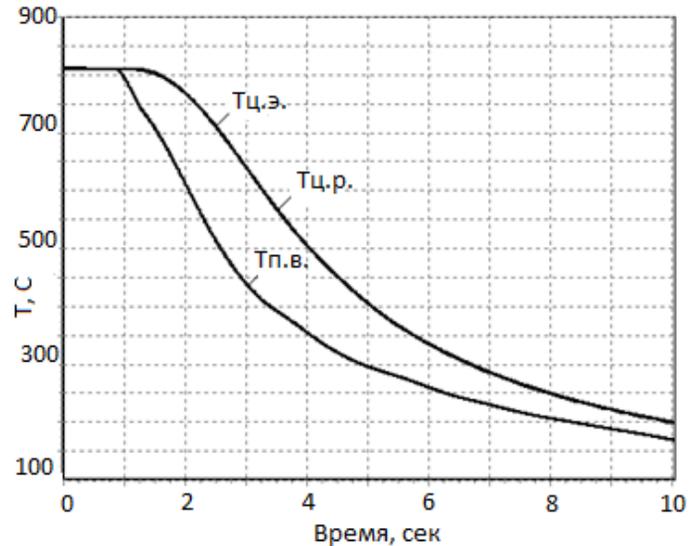


Рис. 1. График температур зонда 10x50 мм, охлаждаемого в 1% водном растворе полимера Юкон-Е при $T_{жс} = 20^\circ\text{C}$, где: $T_{п.в.}$, $T_{ц.э.}$, $T_{ц.р.}$ – соответственно, восстановленная температура поверхности, экспериментальная и расчетная температура центра зонда.

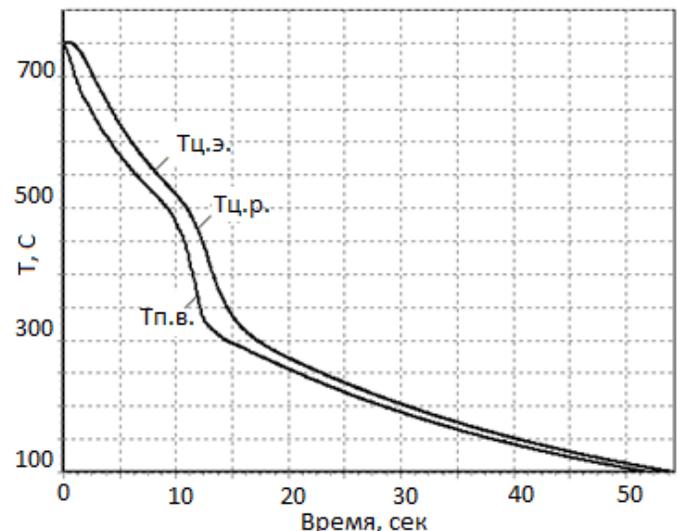


Рис. 2. График температур зонда 12x60 мм, охлаждаемого в масле И-20А при $T_{жс} = 50^\circ\text{C}$, где: $T_{п.в.}$, $T_{ц.э.}$, $T_{ц.р.}$ – соответственно, восстановленная температура поверхности, экспериментальная и расчетная температура центра зонда.

восстановления температуры поверхности по результатам измерения температуры во внутренних точках цилиндрических хромоникелевых зондов (в результате расчета температурного поля и граничных условий теплообмена), установлено следующее:

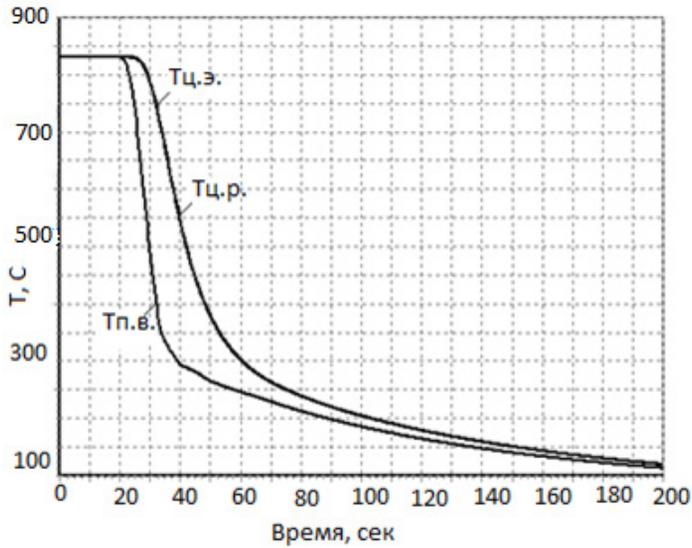


Рис. 3. График температур зонда 25x100 мм, охлаждаемого в рапсовом масле при $T_{ж} = 50^{\circ}\text{C}$, где: $T_{п.в.}$, $T_{ц.э.}$, $T_{ц.р.}$ – соответственно, восстановленная температура поверхности, экспериментальная и расчетная температура центра зонда.

- методическая погрешность восстановления температуры поверхности возрастает с увеличением расстояния от поверхности до точки сбора данных, т.е. методическая погрешность максимальна при решении ОЗТ по температуре центра зонда;

- при высоких скоростях изменения температуры поверхности зонда (компактные ТЗ $D = 10...12$ мм, жидкости с высокой охлаждающей способностью) для обеспечения точности решения уравнения теплопроводности значения температуры необходимо интерполировать или дискретные значения аппроксимировать. Использование в процессе расчетов методов сглаживания дискретных значений опытных данных по температуре, например, с помощью метода наименьших квадратов, при шаге измерения АЦП 0,15сек, повышает точность решения ОЗТ;

- для зондов диаметром 10 мм, 12 мм и 25 мм восстановление температуры поверхности характеризуется погрешностью $\Delta T = \max |T_{ц.р.}(\tau) - T_{ц.э.}(\tau)|$ в пределах 0,3...0,73 $^{\circ}\text{C}$, а для ТЗ диаметром 50 мм – 3,9...4,1 $^{\circ}\text{C}$, что не превышает погрешности измерения температуры термозонда в экспериментах хромель-алюмелевыми ТП.

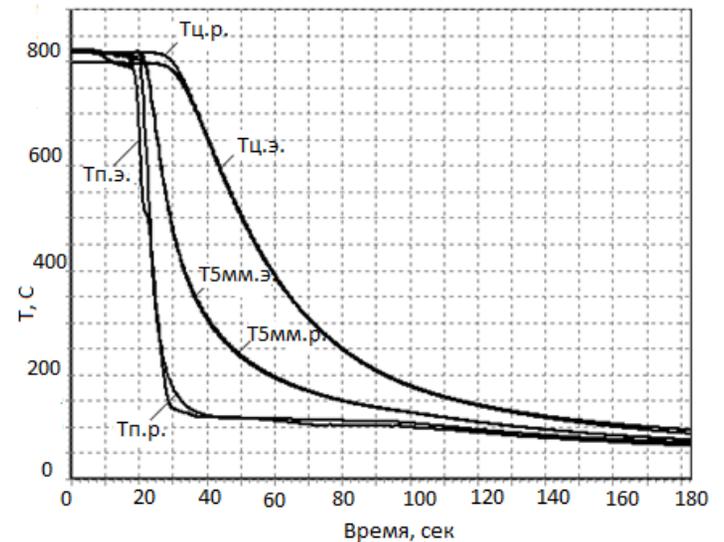
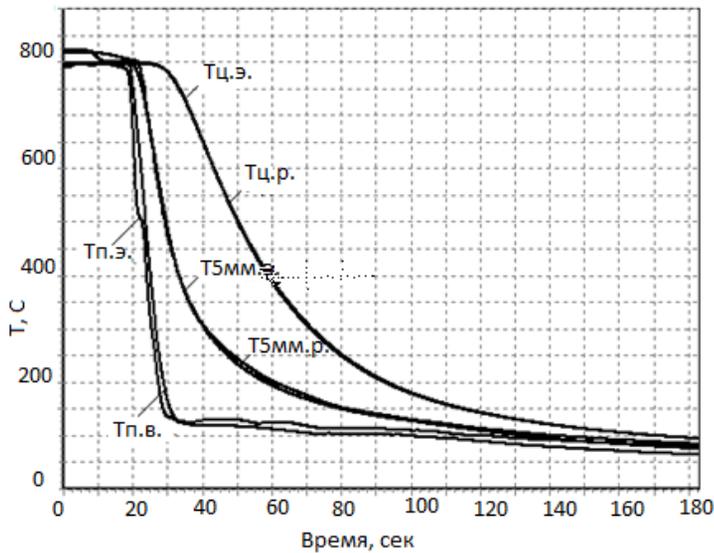


Рис. 4. Графики температур зонда 50x200 мм, охлаждаемого в 14% водном растворе NaCl при $T_{ж} = 20^{\circ}\text{C}$, где:

- а) $T_{ц.э.}$, $T_{п.э.}$, $T_{5мм.э.}$ – соответственно, экспериментальные значения температуры центра, поверхности и на расстоянии 5 мм от поверхности;
 $T_{ц.р.}$, $T_{5мм.р.}$, $T_{п.в.}$ – соответственно, температура расчетная в центре и на расстоянии 5 мм от поверхности, температура поверхности, восстановленная (в результате расчета ОЗТ по $T_{5мм.}$).**
- б) $T_{ц.э.}$, $T_{п.э.}$, $T_{5мм.э.}$ – соответственно, экспериментальные значения температуры центра, поверхности и на расстоянии 5 мм от поверхности;
 $T_{ц.р.}$, $T_{5мм.р.}$, $T_{п.в.}$ – соответственно, температура расчетная в центре и на расстоянии 5 мм от поверхности, температура поверхности восстановленная (в результате расчета ОЗТ по $T_{ц.э.}$).**

Табл. 1. Результаты решения ОЗТ с помощью программы IQLab для хромоникелевых цилиндрических термозондов (сталь X18H9T).

№ рисунка	Размеры термозонда D/H , мм	Охлаждающая жидкость	Температура охлаждающей жидкости, $T_{ж}$, °C	Ошибка при решении ОЗТ, °C
1.	10/50	1% водный раствор полимера Юкон-Е	20	0,73
2.	12/60	минеральное масло И-20А	50	0,3
3.	25/100	рапсовое масло	50	0,46
4а.	50/200	14% водный раствор NaCl	20	4,1
4б.				3,9

Выводы

К достоинствам решения ОЗТ с помощью программы IQLab для термозондов из хромоникелевых сплавов цилиндрической формы, охлаждаемых в жидкостях с различными охлаждающими свойствами, следует отнести:

- для ТЗ размером $D/H = 10/50$ мм, 12/60 мм и 25/100 мм, восстановление температуры поверхности возможно с приемлемой точностью по показаниям одной термопары, расположенной в геометрическом центре ТЗ, что существенно упрощает изготовление термозонда, подготовку и проведение экспериментов;

- для ТЗ размером $D/H = 50/200$ мм с тремя термопарами, расположенными в центре образца, непосредственно на поверхности и на расстоянии 5,0 мм от поверхности, программа дает возможность восстанавливать температуру поверхности по Тц.э. и по Т5ммэ. с близкими и приемлемыми для практического применения значениями ΔT ;

- обнаруженная тенденция увеличения ошибки при восстановлении температуры поверхности при удалении точки сбора данных от поверхности подтверждает целесообразность возможно близкого размещения контрольной термопары к поверхности, прежде всего для габаритных термозондов и сред с высокой скоростью охлаждения;

- решение ОЗТ и восстановление температуры поверхности позволяет рассчитать другие важные характеристики процесса охлаждения образца: плотность теплового потока и коэффициент теплоотдачи;

- программа может быть использована для инженерных, лабораторных расчетов по определению температуры поверхности для цилиндрических образцов диаметром 10...50 мм с одной термопарой, а для более габаритных образцов $D \geq 50$ мм необходимо устанавливать контрольные промежуточные термопары и проводить опытно-промышленные испытания в производственных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. *ISO 9950:1995: Industrial Quenching Oils Determination of Cooling Characteristics–Nickel-Alloy Probe Test Method*, International Standard, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland. – 1995.

2. *ISO 9950, “Industrial Quenching Oils – Determination of Cooling Characteristics- Nickel-Alloy Probe Test Method, 1995(E),”* International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1995.

3. *ASTM D6200-01, Standard Test Method for Determination of Cooling Characteristics of Quench Oils by Cooling Curve Analysis*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, www.astm.org.

4. *Kobasko, N., and Liscic, B., LISCIC/PETROFER probe to investigate real industrial hardening processes and some fundamentals during quenching of steel parts in liquid media.* «EUREKA: Physics and Engineering», 2017, № 6.

5. *Зотов Е.Н., Москаленко А.А., Разумцева О.В., Проценко Л.Н.* Определение коэффициента теплоотдачи при охлаждении серебряных термозондов с учетом эффектов температурно-временной задержки. Журнал «Промышленная теплотехника», 2017, том 39, №5, с. 34–40.

6. *Добри́вечер В.В., Зотов Е.Н., Кобаско Н.И., Моргунок В.С., Сергеев Ю.В.* Программный комплекс «IQLab», коммерчески распространяемый ТОВ «Интенсивные технологии ЛТД» (iqlab@itl/kiev.ua).

7. *Зотов Е.Н., Москаленко А.А., Добри́вечер В.В., Кобаско Н.И., Дейнеко Л.Н.* Использование программы IQLab для выбора оптимальных режимов процесса термообработки стальных изделий. Сборник докладов 6-й Международной конференции «Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов», ОТТОМ-6, ч. II, Харьков, ННЦ ХФТИ, ИПЦ «Контраст», 2005. –с.106–115.

8. *Круковский П.Г.* Обратные задачи тепломассопереноса (Общий инженерный подход). Киев: Ин-т технической теплофизики, 1998, 224с.

FEATURES OF THE APPLICATION OF THE IQLAB PROGRAM FOR SOLVING THE INVERSE HEAT CONDUCTION PROBLEM FOR CHROMIUM-NICKEL CYLINDRICAL THERMOSONDES

Zotov E.N.¹, Moskalenko A.A.¹, Razumtseva O.V.¹, Protsenko L.N.¹, Dobryvechir V.V.²

¹ Institute of Engineering Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, ul. Zhelyabova, 2a, Kiev, 03680, Ukraine

² LTD "Intensive technologies", 68/1, Pobeda ave., Kiev, 03113, Ukraine

<https://doi.org/10.31472/ihe.3.2018.12>

The paper presents an experimental-computational study of the results of using the IQLab program to solve inverse heat conduction problem and restore the surface temperature of cylindrical thermosondes from heat-resistant chromium-nickel alloys while cooling them in liquid media.

The purpose of this paper is to verify the correct operation of the IQLab program when restoring the surface temperature of thermosondes with 1-3 thermocouples. The IQLab program is also designed to solve one-dimensional nonlinear direct lines and inverse heat conduction problems with constant initial and boundary conditions specified as a function of time in a tabular form with a constant and variable time step. A finite-difference method is used to solve the heat equation.

Experiments were carried out on samples $D = 10-50$ mm in liquids with different cooling capacities such as aqueous solutions of NaCl and Yukon-E polymer, rapeseed oil and I-20A mineral oil. For the calculation we used the readings of thermocouples installed at internal points of cylindrical thermosondes.

The advantages of solving inverse heat conduction problems with the IQLab program include the possibility of restoring the surface temperature for cylindrical samples with a diameter of 10 mm to 50 mm with practical accuracy according to the indications of a single thermocouple located in the geometrical center of the thermosonde, which simplifies the manufacture of the probe. For larger dimensions with a diameter $D \geq 50$ mm, it is necessary to install control intermediate thermocouples and perform additional tests.

The solution of inverse heat conduction problems and restoration of the surface temperature of the sample makes it possible to calculate other important characteristics of the cooling process: the heat flux density and the heat transfer coefficient.

References 8, tables 1, figures 4.

Key word: determination of the cooling capacity of a liquid, a thermal probe, direct and inverse heat conduction problems, the IQLab program.

1. *ISO 9950*: 1995: Industrial Quenching Oils Determination of Cooling Characteristics-Nickel-Alloy Probe Test Method, International Standard, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, – 1995.

2. *ISO 9950*, "Industrial Quenching Oils-Determination of Cooling Characteristics-Nickel-Alloy Probe Test Method, 1995 (E)," International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1995.

3. *ASTM D6200-01*, Standard Test Method for Determination of Cooling Characteristics of Quench Oils by Cooling Curve Analysis, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, www.astm.org.

4. Kobasko, N., and Liscic, B., *LISCIC / PETROFER* probe to investigate real industrial hardening processes and some fundamentals during quenching of steel parts in liquid media., *EUREKA: Physics and Engineering*, 2017, No. 6.

5. Zotov E.N., Moskalenko A.A., Razumtseva O.V., Protsenko L.N. Determination of the coefficient of heat transfer during cooling of silver thermosondes taking into account the effects of temperature-time delay. *Journal of Industrial Heat Engineering (Promyshlennaya Teplotekhnika)*, 2017, Vol. 39, No. 5, p. 34–40, (Rus).

6. Dobryvecher V.V., Zotov E.N., Kobasko N.I., Morgunyyuk V.S., Sergeev Yu.V. The software complex "IQLab", commercially distributed by "Intensive technologies LTD" (iqlab@itl/kiev.ua), (Rus).

7. Zotov E.N., Moskalenko A.A., Dobryvecher V.V., Kobasko N.I., Deineko L.N. Using the IQLab program to select the optimal modes for the heat treatment of steel products. Collection of reports of the 6th International Conference "Equipment and Technologies for Heat Treatment of Metals and Alloys", (OTTOM-6), Part II, Kharkov, NSC KIPT, CPC "Contrast", 2005, p.106–115, (Rus).

8. Krukovsky P.G. Inverse problems of heat and mass transfer (General engineering approach). Kiev: Institute of Engineering Thermophysics, 1998, 224 p, (Rus).

Отримано 26.06.2018

Received 26.06.2018