

## СПОСОБ НЕПРЕРЫВНОГО ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ ЛАМИНАРНОГО РЕЖИМА

С.С. Хануни\*, А.Н. Дрязгов, С.В. Пономарев, Л.А. Ведешкина

*Кафедра «Автоматизированные системы и приборы», ТГТУ*

*Представлена членом редколлегии профессором С.В. Мищенко*

**Ключевые слова и фразы:** измерение; ламинарный поток; математическое моделирование; обратная краевая задача; оценка погрешности; теплофизические характеристики.

**Аннотация:** Предложен метод для непрерывного измерения и контроля теплофизических свойств жидкостей методом ламинарного режима, представлен алгоритм обработки результатов измерений. Представлен анализ источников погрешности при нахождении теплофизических свойств жидкости методом ламинарного режима.

### Обозначения

$a$ – температуропроводность, м <sup>2</sup> /с;	$T_{\text{ср.м}}$ – измеряемая среднemasсовая температура жидкости, °С;
$c_p$ – объемная теплоемкость, Дж/(м <sup>3</sup> ·К);	$T_1^*, T_2^*, T_3^*, T_4^*$ – расчетные значения температур на стенке трубки, °С;
$d$ – внутренний диаметр трубки, м;	$T_{\text{ср.м}}^*$ – расчетная среднemasсовая температура жидкости, °С;
$Q$ – расход жидкости, м <sup>3</sup> /с;	$\lambda$ – теплопроводность, Вт/(м·°С).
$U$ – значение температуры жидкости, °С;	
$R$ – внутренний радиус трубки, м;	
$Re$ – критерий Рейнольдса;	
$T_1, T_2, T_3, T_4$ – температуры, измеряемые в слое термометров, °С;	

### Введение

Потоки реальных технологических жидкостей в большинстве случаев представляют собой дисперсные системы (суспензии, эмульсии или жидкостно-газовые смеси), эффективные значения ТФХ которых могут быть измерены только в процессе течения. При остановке течения происходит разделение реальных технологических жидкостей на их компоненты. При этом твердые частицы суспензий выпадают в осадок, эмульсии расслаиваются, мелкие пузырьки газов выделяются из жидкостно-газовых смесей [1, 2].

Традиционные методы и приборы теплофизических измерений основаны на предположении, что образец исследуемой жидкости в процессе измерения должен находиться в неподвижном «квазитвердом» состоянии (в образце не должно быть конвективного переноса теплоты). Поэтому эти методы и приборы не пригодны для измерения эффективных ТФХ потоков реальных технологических жидкостей [1, 2].

Проведенные исследования показали, что наиболее подходящими для измерения эффективных ТФХ потоков технологических жидкостей являются, так называемые, методы ламинарного режима [1, 2]. Достоинством таких методов является возможность непрерывного во времени измерения ТФХ технологических жидкостей в процессе течения через измерительные устройства.

\* С.С. Хануни (Йемен) – докторант кафедры АСП ТГТУ.

В данной работе рассматриваются метод измерения, конструкция измерительной установки, алгоритм обработки результатов измерений и оценка погрешности при экспериментальном определении теплофизических свойств жидкости в процессе ламинарного течения. В ходе проведения измерений и последующей обработки результатов по компьютерной программе определяются следующие параметры исследуемой жидкости: теплопроводность  $\lambda$ , Вт/(м·К); температуропроводность  $a$ , м<sup>2</sup>/с; объемная теплоемкость  $c_p$ , Дж/(м<sup>3</sup>·К). Предлагаемый метод может использоваться для непрерывного контроля теплофизических свойств жидкостей в ходе производственного процесса.

## 1 Конструкция измерительной установки

Основные структурные блоки, входящие в измерительную установку, показаны на рис. 1. Основным блоком здесь является измерительное устройство. Его физическая модель рассматривается в следующем разделе.

Теплофизические свойства определяются для ламинарного потока жидкости. Он может отходить от основного потока технологической жидкости с помощью байпасной линии. На входе в измерительное устройство поток жидкости должен иметь постоянную температуру и расход. Расход жидкости выбирается таким образом, чтобы критерий Рейнольдса внутри измерительного устройства не превышал критического значения для ламинарного режима течения. Предполагая (с достаточным запасом), что  $Re_{кр} = 2300$ , получаем следующее выражение для расчета максимального расхода исследуемой жидкости через измерительное устройство:  $Q_{max} = 575 \frac{\pi d \mu}{\rho}$ , где  $d$  – внутренний диаметр трубки в измерительном



Рис. 1 Структурная схема измерительной установки

устройстве,  $m$  (см. ниже описание физической модели датчика);  $\mu$  – динамическая вязкость исследуемой жидкости, Па·с;  $\rho$  – плотность исследуемой жидкости, кг/м<sup>3</sup>. Расход жидкости на входе в устройство должен быть постоянным и стабильным, без каких-либо пульсаций и колебаний.

Температура исследуемой жидкости на входе в измерительное устройство должна совпадать с температурой теплоносителя, который подается в теплообменник измерительного устройства. Для обеспечения этого условия перед входом в устройство может устанавливаться дополнительный теплообменник. Кроме того, желательно, чтобы температура жидкости и теплоносителя совпадала с температурой окружающей среды в месте, где установлено измерительное устройство. Это уменьшит теплообмен между устройством и окружающей средой и повысит точность измерений.

Внутри измерительного устройства имеется нагреватель. Мощность этого нагревателя регулируется специальным блоком и является одним из параметров расчета. Измерительное устройство подключается к блоку преобразователей, в котором для каждого канала измерения предусмотрена специальная мостовая схема (значения температуры в датчике измеряются с помощью медных термометров сопротивления, подключенных по трехпроводной схеме). Сигналы с термометров сопротивления через АЦП поступают в персональный компьютер, где обрабатываются по специальной программе в соответствии с изложенным ниже алгоритмом (см. Метод решения обратной краевой задачи). После выполнения расчета искомые значения теплофизических свойств жидкости отображаются на дисплее компьютера. При наличии достаточных вычислительных ресурсов обратная краевая задача может решаться непосредственно в ходе измерений, т.е. свойства жидкости можно контролировать в режиме реального времени.

## 2 Метод решения обратной краевой задачи

Решение обратной краевой задачи заключается в том, что подбираются такие значения теплопроводности  $\lambda$  и температуропроводности  $a$  исследуемой жидкости, при которых расчетные значения температур на стенке трубки  $T_1^*$ ,  $T_2^*$ ,  $T_3^*$ ,  $T_4^*$  и среднемассовой температуры жидкости на выходе  $T_{ср.м}^*$  [6] совпадают со значениями, полученными по соответствующим каналам с измерительного устройства ( $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_4$ ,  $T_{ср.м}$ ). Реализованный в настоящее время алгоритм позволяет подобрать любые две температуры по двум варьируемым параметрам ( $\lambda$  и  $a$ ). С точки зрения минимизации погрешности наиболее предпочтительным вариантом является использование температур  $T_3$  и  $T_{ср.м}$ , либо  $T_2$  и  $T_{ср.м}$ . В случае выхода из строя канала для измерения среднемассовой температуры жидкости на выходе устройства, теплофизические свойства могут оцениваться по температурам  $T_2$  и  $T_3$ . Однако в этом случае значительно возрастает влияние погрешности измерения температуры на погрешность определяемых теплофизических свойств жидкости (см. Оценка метрологических характеристик измерительной установки).

Подбор значений  $\lambda$  и  $a$  осуществляется с помощью модифицированного метода покоординатного спуска, адаптированного для данной задачи. В результате многократных численных экспериментов установлено, что температура, измеряемая на стенке трубки  $T_3$  наилучшим образом характеризует теплопроводность жидкости  $\lambda$ , в то время как среднемассовая температура на выходе  $T_{ср.м}$  характеризует теплоемкость жидкости  $ср$ .

*Алгоритм подбора включает следующие этапы:*

1) выбираются начальные приближения для  $\lambda$  и  $a$ . Задаются начальные коэффициенты  $\delta\lambda$ ,  $\delta a$ , используемые как относительные приращения  $\lambda$  и  $a$  в ходе итераций;

2) расчетное значение температуры  $T_3^*$  сравнивается со значением  $T_3$ , полученным с АЦП. Если расчетное значение температуры оказалось больше измеренного, то оба значения  $\lambda$  и  $a$  умножаются на величину  $(1 + \delta\lambda)$ . Если расчетное значение меньше измеренного, то они делятся на  $(1 + \delta\lambda)$ ;

3) если знак отклонения расчетного значения температуры от измеренного на данной итерации не совпадает с предыдущей итерацией, то шаг приращения по  $\lambda$  уменьшается в два раза. Новое значение  $\delta\lambda$  будет использовано на следующей итерации;

4) если относительное отклонение расчетной температуры  $T_3^*$  от измеренного значения  $T_3$  меньше некоторой установленной величины, переходим к этапу 5. Иначе, текущие значения  $\lambda$  и  $a$  используются в качестве следующего приближения. Максимально допустимое относительное отклонение расчетного значения температуры от измеренного вычисляется как функция от коэффициента  $\delta a$ . Таким образом, по мере приближения к искомому значению температуропроводности будут повышаться требования к точности подбора значения теплопроводности;

5) расчетное значение среднemasовой температуры жидкости на выходе устройства сравнивается с соответствующим измеренным значением. Если расчетное значение больше, чем измеренное, то текущее значение  $a$  делится на величину  $(1 + \delta a)$ . Если расчетное значение меньше измеренного, то значение  $a$  умножается на  $(1 + \delta a)$ ;

6) если знак отклонения расчетного значения  $T_{\text{ср.м}}^*$  от измеренного значения  $T_{\text{ср.м}}$  на данной итерации отличается от предыдущей итерации, то величина коэффициента  $\delta a$  уменьшается в два раза;

7) коэффициент  $\delta\lambda$  рассчитывается как функция от  $\delta a$ . Это необходимый этап, т.к. после выполнения шага по параметру  $a$ , нужно заново начинать приближение по  $\lambda$ ;

8) полученные на данном этапе значения  $\lambda$  и  $a$  используются при следующем расчете температурного поля, т.е. на следующей итерации. Критерием окончания расчета, т.е. подбора истинных значений теплопроводности и температуропроводности жидкости, можно считать выполнение условия:  $\delta a < \varepsilon_a$ , т.е. достижение некоторого минимального приращения по температуропроводности.

Данный алгоритм многократно использовался при решении обратных задач для ряда режимов работы рассматриваемых метода и измерительного устройства. В ходе выполнения расчетов не было выявлено признаков неустойчивости и некорректности полученных результатов.

### **3 Оценка метрологических характеристик измерительной установки**

Проанализируем основные источники погрешности при определении теплофизических свойств исследуемой жидкости. Эта погрешность будет складываться из следующих факторов: погрешности, вызванной отклонением абстрактной математической модели от реальности, погрешности измерения температур  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_{\text{ср.м}}$  и исходной температуры жидкости  $T_0$ , погрешности решения прямой краевой задачи теплопроводности (т.е. нахождения значений  $T_2^*$ ,  $T_3^*$ ,  $T_{\text{ср.м}}^*$ ), погрешности решения обратной краевой задачи.

Первый из этих факторов включает в себя погрешность, вызванную частичной неадекватностью математической модели реальной установке, наличием допущений (см. список основных допущений в разделе Математическая модель измерительного устройства [6]), погрешностью в задании геометрических и теплофизических параметров датчика, нестабильностью мощности нагревателя и т.п. Влияние этого фактора может быть уменьшено за счет введения поправок после проведения серии пробных экспериментов на жидкостях с известными свойствами.

Погрешность измерения температур складывается из погрешности, вносимой термометрами сопротивления, устройством сопряжения и АЦП. Можно предположить, что измерять температуру с абсолютной погрешностью меньше 0,01 °С при разумной стоимости измерительной установки не получится. В существующей экспериментальной установке погрешность измерения температуры по каждому каналу не превышает 0,05 °С.

Погрешность решения прямой краевой задачи связана с конечно-разностной аппроксимацией дифференциального уравнения и краевых условий. На нее оказывает влияние выбранная расчетная схема, число узлов сетки и величина шага по каждой из координат, включая время, способ аппроксимации граничных условий, момент отсчета значений (критерий, по которому судят о достижении стационарного температурного поля).

В результате проведения серии численных экспериментов было установлено, что использование симметричной разностной схемы (схемы переменных направлений) при одном и том же шаге по времени приводит к меньшим погрешностям в стационарном режиме, чем использование чисто неявной схемы (локально-одномерной схемы с параметром  $\sigma = 1$ ). В данной работе рассматривается только численная схема, реализующая метод переменных направлений. Однако, в компьютерной программе, используемой для расчета, реализована также локально-одномерная чисто неявная схема, подробно описанная в [4]. При значительном уменьшении шага по времени чисто неявная схема сходится к тем же значениям, что и симметричная схема, но последняя сходится намного быстрее. Этот результат хорошо согласуется с критериями асимптотической устойчивости, полученными в [5] для симметричной и чисто неявной разностных схем.

Кроме того, изучалось влияние числа узлов сетки в различных слоях на погрешность рассчитанных значений температуры. Пока, к сожалению, не представляется возможным сформулировать четкие рекомендации относительно того, как следует выбирать шаг сетки в отдельных слоях измерительного устройства. Единственным предположением на этот счет, которое подтверждается численными экспериментами, является то, что минимально возможный шаг сетки следует выбирать в слоях, где тепловой поток ( $q = \lambda \partial U / \partial r$ ) достигает максимального значения по абсолютной величине. Следует только учитывать, что при превышении определенного соотношения между шагом по времени и шагом по координате симметричная схема перестает быть устойчивой.

Погрешность определения теплофизических свойств жидкости фактически является погрешностью решения обратной краевой задачи теплопроводности. В ходе этого решения проявляются некоторые дополнительные факторы, оказывающие влияние на суммарную погрешность. Одним из важных моментов является выбор критерия, по которому принимается решение о том, что рассчитанное температурное поле соответствует экспериментальному (т.е. найденные в расчете значения  $\lambda$  и  $a$  соответствуют действительным). Как уже говорилось, кроме начальной температуры жидкости  $T_0$ , измеряются следующие значения температур:  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_4$ ,  $T_{\text{ср.м}}$ . На температуры  $T_1$  и  $T_4$  на первой и последней секциях измерительного устройства большое влияние оказывает отток тепла по медной трубке, который мы не можем с достаточной степенью точности учесть в расчет-

ной модели. Поэтому основными измеряемыми параметрами являются температуры  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_{\text{ср.м}}$ . Предполагаем, что погрешность измерения всех значений температур одинакова (хотя, на самом деле, среднемассовая температура жидкости измеряется чуть более точно, чем температуры на стенке трубки). Для подбора двух теплофизических свойств ( $\lambda$  и  $a$ ) необходимо иметь по крайней мере два измеряемых значения температуры. Можно учитывать и большее число параметров, но при этом резко возрастает вычислительная сложность и время решения обратной краевой задачи.

В результате проведения серии численных экспериментов получены следующие оценки относительной погрешности определения теплофизических свойств жидкости (воды) в зависимости от того, с какой точностью измеряются температуры и какие конкретно значения температур используются в расчете.

Абсолютная погрешность измерения температуры $\Delta T$ , °C	Относительная погрешность определения теплопроводности $\lambda$ , %			Относительная погрешность определения температуропроводности $a$ , %		
	по $T_2, T_3$	по $T_2, T_{\text{ср.м}}$	по $T_3, T_{\text{ср.м}}$	по $T_2, T_3$	по $T_2, T_{\text{ср.м}}$	по $T_3, T_{\text{ср.м}}$
0,005	2,78	0,18	0,18	7,18	0,35	0,35
0,01	5,55	0,36	0,35	14,71	0,69	0,69
0,05	27,69	1,83	1,74	83,22	3,45	3,31
0,1	–	3,77	3,50	–	6,91	6,70

Как видно из этой таблицы, наименьшая погрешность получается при использовании температуры  $T_3$  на предпоследней секции измерительного участка и среднемассовой температуры жидкости  $T_{\text{ср.м}}$  на выходе из датчика. В целом, судя по этой таблице, можно предположить, что относительная погрешность определения теплопроводности составит порядка 3...5 %, а погрешность определения температуропроводности – порядка 7...8 %.

#### Список литературы:

1. Пономарев С.В. Методы и устройства для измерения эффективных теплофизических характеристик потоков технологических жидкостей / С.В. Пономарев, С.В. Мищенко. – Тамбов: Изд. ТГТУ, 1997. – 249 с.
2. Ponomarev S.V. Measurements of Thermophysical Properties by Laminar Flow Methods / S.V. Ponomarev, S.V. Mishchenko, T.F. Irvine. – New-York: Begell House Inc., 2001. – 250 p.
3. Петухов Б.С. Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах. – М.: Энергия, 1967. – 411 с.
4. Самарский А.А. Теория разностных схем. – 3-е изд. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. – 616 с.
5. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
6. Хануни С.С. Моделирование измерительного устройства для измерения теплофизических свойств жидкости методом ламинарного режима / С.С. Хануни, А.Н. Дрязгов, С.В. Пономарев // Вестник ТГТУ. 2003. – Т. 9, № 4. – С. 619 – 631.

## Continuous Measurement and the Control of Liquid Thermal Properties by the Method of the Laminar Mode

S.S. Hanuni, A.N. Dryazgov, S.V. Ponomarev, L.A. Vedeshkina

*Department «Automated Systems and Devices», TSTU*

**Key words and phrases:** error estimation; laminar flow; mathematical modeling; measurement; return regional problem; thermal characteristics.

**Abstract:** The method for continuous measurement and the control of liquids thermal properties is offered by a method of laminar mode, the algorithm of results processing of measurements is submitted. The analysis of error sources is submitted at finding liquid thermal properties by a method of a laminar mode.

---

## Methode des stetigen Messens und der Kontrolle der wärmephysikalischen Eigenschaften der Flüssigkeit durch die Methode des Laminarregimes

**Zusammenfassung:** Es ist die Methode für das stetige Messen und der Kontrolle der wärmephysikalischen Eigenschaften der Flüssigkeiten durch die Methode des Laminarregimes angeboten. Es ist der Algorithmus der Bearbeitung der Ergebnisse der Messen vorgestellt. Es ist die Analyse der Quellen des Fehlers bei dem Auffinden der wärmephysikalischen Eigenschaften der Flüssigkeit durch die Methode des Laminarregimes vorgestellt.

---

## Méthode de la mesure continue et du contrôle des propriétés thermophysiques du liquide par la méthode du régime laminaire

**Résumé:** On a proposé la méthode de la mesure continue et du contrôle des propriétés thermophysiques du liquide par la méthode du régime laminaire, on a présenté l'algorithme du traitement des résultats de la mesure. On a présenté l'analyse des sources des erreurs des mesures au cours de la recherche des propriétés thermophysiques du liquide par la méthode du régime laminaire.

---