

## УСТРОЙСТВО И МЕТОД НЕПРЕРЫВНОГО ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ ЛАМИНАРНОГО РЕЖИМА

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.

В данной работе рассматривается, конструкция измерительной установки и метод измерения 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.

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

Теплофизические свойства определяются для ламинарного потока жидкости. Он может отрываться 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 устройстве, м (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.



**Рис. 1 Структурная схема измерительной установки**

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. 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.

Предполагается, что ламинарный поток исследуемой жидкости протекает по медной трубке, которая снаружи обогревается намотанным на нее проволочным нагревателем из константана. Подробно данная физическая модель рассматривается в [3]. Весь участок нагрева разбивается по длине на несколько (четыре или более) секций, примерно одинаковых по длине. В ходе эксперимента измеряются средние интегральные температуры нагревателя по длине каждой из секций. Для случая четырех секций будем обозначать их  $T_1, T_2, T_3, T_4$ . Кроме того, измеряется среднемассовая температура жидкости на выходе из датчика. Будем обозначать ее  $T_{ср.м}$ .

Неизвестные ТФС жидкости находятся в результате решения обратной краевой задачи теплопроводности. Это решение основывается на численном решении прямой краевой задачи, т.е. на моделировании температурного поля внутри измерительного устройства (датчика). Прямая краевая задача и способы ее решения описываются в [3]. Здесь отметим только, что дифференциальные уравнения энергии и краевые условия, записанные для исследуемой жидкости, стенки трубки и других частей измерительного устройства, заменяются соответствующими конечно-разностными уравнениями, которые решаются методом прогонки. При расчете используется либо локально-одномерная чисто неявная разностная схема [4], либо симметричная схема переменных направлений. Значения ТФС жидкости подбираются таким образом, чтобы минимизировать отклонение значений температуры, полученных для рассчитанного температурного поля ( $T_2^*, T_3^*, T_{ср.м}^*$ ) от соответствующих значений ( $T_2, T_3, T_{ср.м}$ ), получаемых из эксперимента.

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 подробно рассмотрен в работе [5], данный алгоритм многократно использовался при решении обратных задач для ряда режимов работы рассматриваемых метода и измерительного устройства. В ходе выполнения расчетов, признаков неустойчивости и некорректности полученных результатов не было выявлено.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Пономарев С.В., Мищенко С.В. Методы и устройства для измерения эффективных теплофизических характеристик потоков технологических жидкостей. Тамбов: Изд.-во Тамб. гос. техн. ун-та, 1997. 249 с.
- 2 Ponomarev S.V., Mishchenko S.V., Irvine T.F. Measurements of Thermophysical Properties by Laminar Flow Methods. New-York: Begell House Inc., 2001. 250 p.
- 3 Хануни С.С., Дрязгов А.Н., Пономарев С.В. Моделирование измерительного устройства для измерения теплофизических свойств жидкости методом ламинарного режима // Вестник ТГТУ. 2003. Т. 9, № 4.
- 4 Самарский А.А. Теория разностных схем. 3-е изд. М.: Наука, 1989. 616 с.
- 5 Хануни С.С., Дрязгов А.Н., Пономарев С.В. Метод непрерывного измерения и контроля теплофизических свойств жидкости методом ламинарного режима // Вестник ТГТУ. 2004. Т. 10, № 2.

*Кафедра «Автоматизированные системы и приборы»*