

ББК У9(2)301-21

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ МЕТОДОМ ЛАМИНАРНОГО РЕЖИМА

С.В. Пономарев, С.А. Малютина

Тамбовский государственный технический университет

Рецензент С.В. Мищенко

Ключевые слова и фразы: измерение; коэффициент температуропроводности; метод ламинарного режима; оптимальные режимные параметры; робастное проектирование.

Аннотация: Рассматривается применение метода робастного проектирования Генити Тагути для улучшения метрологических характеристик процесса измерения коэффициента температуропроводности методом ламинарного режима. Производится выбор оптимальных режимных параметров рассматриваемого процесса с целью уменьшения погрешности, и, следовательно, повышения качества измерения.

Введение

Соединив статистические методы с глубоким пониманием инженерных задач, д-р Тагути создал мощный инструмент для улучшения качества. В центре его метода робастного проектирования стоит снижение влияния факторов, называемых помехами или шумами, случайные изменения (вариации) которых ухудшают качественные показатели изделия или процесса. В этом его радикальное отличие от традиционной техники качества, которая предусматривает идентификацию существенных источников помех и проведение измерений, зачастую дорогостоящих, с целью их контроля. Использование методики робастного проектирования обеспечивает нечувствительность разработанного процесса к шуму за счет правильного выбора определенных параметров этого процесса, называемых управляе-

Пономарев С.В. – доктор технических наук, профессор, заместитель заведующего кафедрой «Автоматизированные системы и приборы», ТГТУ; Малютина С.А. – магистрантка ТГТУ.

мыми факторами. Поскольку задавать эти параметры обычно достаточно легко, «высокое качество достигается при минимальных затратах» [1].

Цель данной работы заключается в применении методологии робастного проектирования [1] для определения оптимальных режимных параметров процесса измерения температуропроводности одним из методов ламинарного режима [2].

Основные измерительные операции при определении коэффициента температуропроводности жидкостей

При измерении коэффициента температуропроводности жидкостей методом ламинарного режима используют измерительные трубки (рис. 1), изготовленные на основе центральной трубки 1, состоящие из изотермического участка длиной $l_{из}$ и теплообменного участка длиной l_T с установленными на них водяными рубашками – теплообменниками 2, 3.

На входе и выходе измерительной трубки, а также на патрубке теплообменника 3, установлены измерители среднемассовой температуры 4, обеспечивающие перемешивание жидкости и измерение ее среднемассовой температуры термopарами 5.

Направление движения исследуемой жидкости на рис. 1 показано стрелками А. Стрелками В и С показано направление движения жидкостей-теплоносителей, охлаждающих или нагревающих изотермический и теплообменный участки измерительных трубок. Измерительные операции осуществляются в основном в следующем порядке [2]:

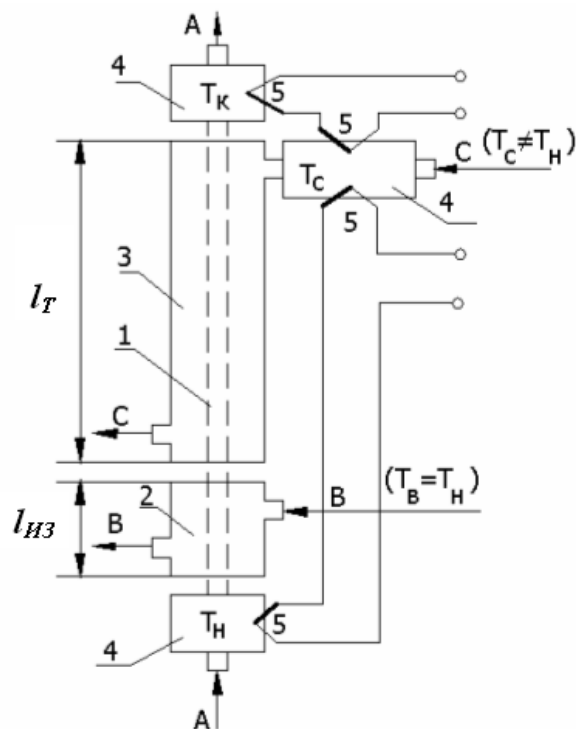


Рис. 1 Схема измерительных трубок

а) исследуемую жидкость А, подогретую до начальной температуры T_n , пропускают через измерительную трубку с постоянной скоростью так, чтобы режим течения был ламинарный;

б) изотермический участок, предназначенный для получения установившегося параболического профиля скорости на входе в теплообменный участок, обогревают путем пропускания большого количества жидкости-теплоносителя В через теплообменник 2, причем температура T_b этой жидкости В должна быть равна температуре T_n исследуемой жидкости на входе в измерительную трубку ($T_b = T_n$);

в) теплообменный участок, предназначенный для проведения измерений, обогревают потоком жидкости-теплоносителя С, температура T_c которой должна отличаться от температуры T_n исследуемой жидкости на входе в измерительную трубку ($T_c \neq T_n$);

г) с использованием измерителей 4 среднemasсовой температуры измеряют температуру T_n исследуемой жидкости на входе и среднemasсовую температуру T_k исследуемой жидкости на выходе измерительной трубки, а также температуру T_c стенки трубки на теплообменном участке;

д) одновременно измеряют расход g исследуемой жидкости через измерительную трубку;

е) коэффициент температуропроводности исследуемой жидкости определяют с использованием приведенной ниже расчетной зависимости, вывод которой осуществлен в [2].

Определение оптимальных условий эксперимента при измерении коэффициента температуропроводности

Рассмотрим полученное в [2] основное расчетное соотношение, лежащее в основе рассматриваемого метода измерения коэффициента температуропроводности a

$$a = \frac{2g}{\pi l_T} f(\bar{\theta}), \quad (1)$$

где g – расход исследуемой жидкости; l_T – длина теплообменного участка измерительной трубки; $\bar{\theta} = \frac{T_k - T_c}{T_n - T_c}$ – безразмерная среднemasсовая температура исследуемой жидкости.

Применив к зависимости (1) традиционные подходы теории погрешностей измерения физических величин, в книге [2] была получена формула для нахождения относительной погрешности определения коэффициента температуропроводности

$$\delta a = \sqrt{\delta^2 g + \delta^2 l_T + \left[\frac{1}{f(\bar{\theta})} \frac{df(\bar{\theta})}{d\bar{\theta}} \right]^2 \left[1 + (\bar{\theta})^2 \right] \delta^2 (T_n - T_c)}, \quad (2)$$

где δa , δg , δl_T , $\delta(T_n - T_c)$ – относительные погрешности измерения коэффициента температуропроводности a , расхода исследуемой жидкости g , длины теплообменного участка l_T и разности температур $(T_n - T_c)$, соответственно.

Из (2) видно, что относительная погрешность δa определения коэффициента температуропроводности зависит от функции

$$\bar{\xi}(\bar{\theta}) = \left[\frac{1}{f(\bar{\theta})} \frac{df(\bar{\theta})}{d\bar{\theta}} \right] \sqrt{1 + (\bar{\theta})^2},$$

которая в свою очередь зависит от величины $\bar{\theta} = \frac{(T_k - T_c)}{(T_H - T_c)}$ (безразмерной

среднемассовой температуры исследуемой жидкости на выходе измерительной трубки), которая легко может контролироваться в процессе эксперимента, что является достоинством формулы (2).

На основе формулы (2) была составлена программа для расчета зависимости относительной случайной погрешности δa измерения коэффициента температуропроводности от безразмерной величины $\bar{\theta}$ и относительных погрешностей δg , δl_t , $\delta(T_H - T_c)$. Результаты расчета погрешностей представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчета зависимости относительных погрешностей δa измерения коэффициента температуропроводности от безразмерной температуры $\bar{\theta}$ при различных значениях расхода

$\bar{\theta} = \frac{T_k - T_c}{T_H - T_c}$	$\bar{z} = f(\bar{\theta})$	δa , %, при g , равном				
		0,5	1,0	1,5	2,0	4,0
0,836	0,01	11,44	9,10	8,60	8,42	8,24
0,684	0,03	9,64	6,70	6,00	5,73	5,47
0,579	0,05	9,11	5,92	5,12	4,80	4,48
0,495	0,07	8,89	5,57	4,71	4,37	4,01
0,426	0,09	8,78	5,40	4,50	4,13	3,76
0,367	0,11	8,73	5,31	4,40	4,03	3,63
0,317	0,13	8,71	5,28	4,36	3,99	3,59
0,274	0,15	8,72	5,30	4,38	4,01	3,62
0,236	0,17	8,75	5,35	4,44	4,08	3,69
0,204	0,19	8,81	5,44	4,55	4,19	3,82
0,176	0,21	8,89	5,56	4,70	4,35	3,99
0,152	0,23	8,99	5,73	4,89	4,56	4,22
0,132	0,25	9,13	5,95	5,14	4,83	4,51
0,114	0,27	9,31	6,22	5,46	5,17	4,87
0,099	0,29	9,55	6,58	5,86	5,59	5,31
0,085	0,31	9,87	7,03	6,37	6,12	5,87
0,073	0,33	10,31	7,63	7,03	6,80	6,58
0,063	0,35	10,92	8,44	7,90	7,70	7,50
0,055	0,37	11,80	9,56	9,08	8,91	8,74
0,047	0,39	13,14	11,16	10,76	10,61	10,47
0,041	0,41	15,28	13,62	13,29	13,17	13,05

С точки зрения подходов Тагути, безразмерная величина $\bar{\theta}$ и относительные погрешности δg , $\delta(T_n - T_c)$, δl_T непосредственно измеряемых физических величин (расхода g , разности температур $(T_n - T_c)$ и длины l_T теплообменного участка) являются характеристиками входных параметров для процесса измерения температуропроводности и оказывают непосредственное влияние на результирующую погрешность измерения. Таким образом, уменьшение разброса выходной характеристики достигается путем поддержания требуемых значений входных параметров, определенных ниже.

На рис. 2 представлены графики зависимости относительной случайной погрешности δa измерения коэффициента температуропроводности a от безразмерной величины $\bar{\theta}$, рассчитанные по формуле (2) при значениях $\delta l_T = 0,2\%$, $\delta(T_n - T_c) = 1\%$. Значения относительных погрешностей $\delta g = \frac{\Delta g}{g}$ измерения расхода жидкости g через измерительную трубку вычисляли, принимая абсолютную погрешность измерения расхода $\Delta g = 0,05$ мл/с.

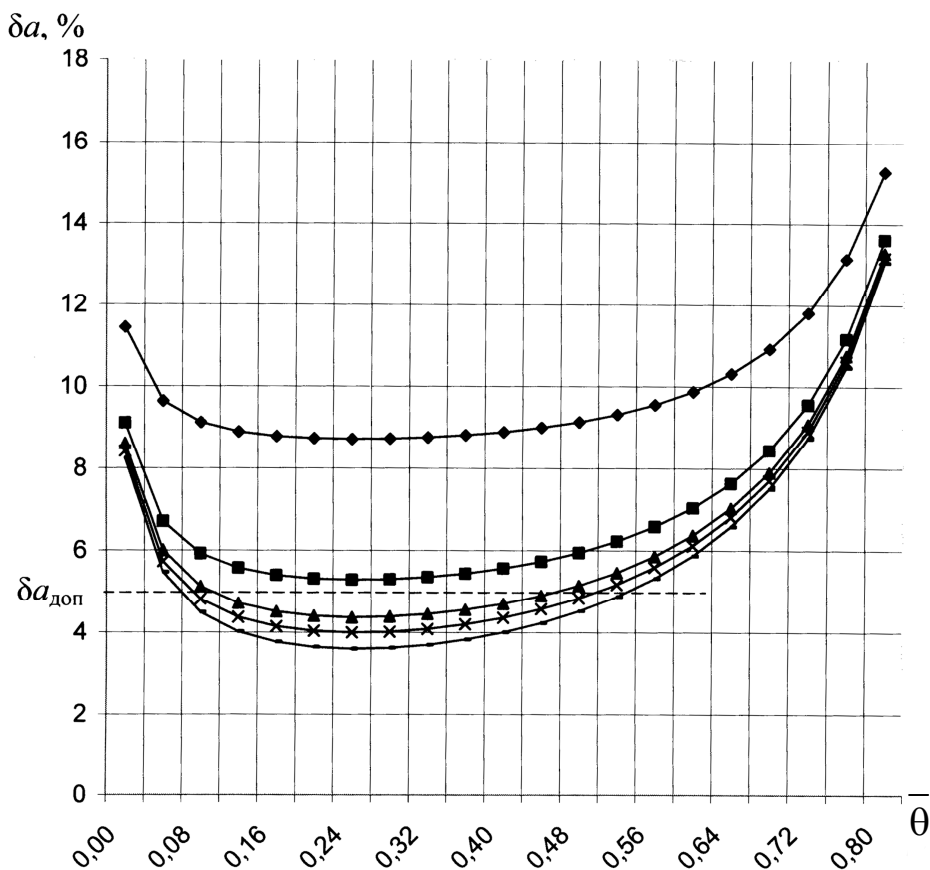


Рис. 2 Графики зависимости относительных погрешностей измерения температуропроводности при различных расходах жидкости при g , равном: \blacklozenge — 0,5 мл/с; \blacksquare — 1 мл/с; \blacktriangle — 1,5 мл/с; \times — 2 мл/с; \blacklozenge — 4 мл/с

Приведенные на рис. 2 графики можно рассматривать как некоторый аналог функции потерь качества. В нашем случае максимальное качество процесса измерения соответствует минимальной погрешности экспериментального определения коэффициента температуропроводности, которая достигается при определенном значении параметра $\bar{\theta}$. Погрешность измерения изменяется в зависимости от близости к найденному оптимальному значению $\bar{\theta}$, принятому за номинальное.

Наиболее существенными факторами, влияющими на погрешность измерения, являются расход g и безразмерная величина $\bar{\theta}$. Поэтому, выбирая оптимальные значения этих входных параметров при постоянных значениях других величин, можно свести разброс выходной характеристики, т. е. погрешность измерения, к минимуму.

Если принять в качестве допустимой относительной погрешности измерения коэффициента температуропроводности величину $\delta a_{\text{доп}} = 5\%$, то из рис. 2 видно, что приемлемая погрешность измерения имеет место при наибольшем значении расхода $g = 4$ мл/с и при $0,08 < \bar{\theta} < 0,55$.

Таким образом, варьируя эти два фактора (расход g и безразмерную величину $\bar{\theta}$), определим минимальное значение погрешности измерения коэффициента температуропроводности и соответствующие ему значения расхода g и безразмерной величины $\bar{\theta}$.

На первом этапе при постоянном значении расхода, изменяя безразмерную величину $\bar{\theta}$ с шагом 0,005, по формуле (2) найдем минимальное значение погрешности измерения δa и соответствующий ему параметр $\bar{\theta}$: $\delta a = 3,99\%$ при $\bar{\theta} = 0,317$.

Таким образом, при значении безразмерной величины $\bar{\theta} = 0,317$ и расходе $g = 2$ погрешность измерения коэффициента температуропроводности будет иметь минимальное значение $\delta a = 3,99\%$.

На втором этапе определим оптимальное значение расхода g . Как видно из формулы (2) с учетом, что $\delta g = \frac{\Delta g}{g}$ (где $\Delta g = 0,05$ мл/с – абсолютная погрешность измерения расхода жидкости), результирующая погрешность измерения коэффициента температуропроводности δa уменьшается с увеличением расхода жидкости g через измерительную трубку. Но, увеличивая расход, нужно учитывать, что режим течения должен оставаться ламинарным и измерения следует вести в диапазоне чисел Рейнольдса, не превышающих критическое значение $Re < 2300$. Это связано с тем, что при увеличении чисел Рейнольдса в потоке жидкостей появляется перемежающаяся турбулентность, т.е. ламинарный режим течения нарушается прохождением турбулентных вихрей, а при уменьшении чисел Рейнольдса на ламинарный режим течения начинает оказывать сильное влияние естественная конвекция.

Число Рейнольдса находится по формуле

$$Re = \frac{\varpi d \rho}{\mu}, \quad (3)$$

где ϖ – средняя скорость течения; d – диаметр измерительной трубки, $d = 4$ мм; ρ – плотность жидкости; μ – динамическая вязкость жидкости.

Расход жидкости равен $g = \frac{\varpi \pi d^2}{4}$, откуда выразим ϖ

$$\varpi = \frac{4g}{\pi d^2}. \quad (4)$$

Подставив (4) в (3), получим

$$Re = \frac{4g\rho}{\mu\pi d} = \frac{4g}{\nu\pi d}, \quad (5)$$

где $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ – кинематическая вязкость.

Таким образом, формула (5) позволяет найти значение расхода, при котором еще выполняется условие ламинарного режима течения жидкости

$$g = \frac{\pi d \nu Re}{4}. \quad (6)$$

Для того чтобы гарантировать ламинарный режим течения в измерительном устройстве, мы приняли критическое значение числа Рейнольдса $Re_{кр} = 1800$. Задав диаметр измерительной трубки, например, равным 4 мм, можно легко посчитать значение критического расхода $g_{кр}$ для любой жидкости. Например, определив по справочнику [4] значение кинематической вязкости воды $\nu = 0,9903 \cdot 10^{-6}$ м²/с при температуре 20 °С, пользуясь (6), получили, что при $Re_{кр} = 1800$ и $d = 4$ мм фактический расход g не должен превышать критическое значение $g_{кр}$, равное

$$g_{кр} \leq \frac{\pi d \nu Re_{кр}}{4} = \frac{3,14159 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \cdot 0,9903 \cdot 10^{-6} \cdot 1800}{4} = 5,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с} = 5,6 \text{ мл/с}.$$

Для воды допустимым значением расхода через измерительную трубку, при котором выполняется условие ламинарного режима течения, является 5,6 мл/с.

Таким образом, для процесса измерения температуропроводности воды оптимальными режимными параметрами будут следующие значения:

- безразмерная величина $\bar{\theta} = 0,317$;
- расход $g = 5,6$ мл/с.

На рис. 3 приведена иллюстрация поиска одним из градиентных методов [7] оптимальных параметров процесса измерения коэффициента температуропроводности воды. Из рис. 3 видно, что из какой бы начальной точки 1 – 5 не происходит поиск оптимальных параметров, он приводит к одним и тем же значениям безразмерной величины $\bar{\theta}$ и расхода g .

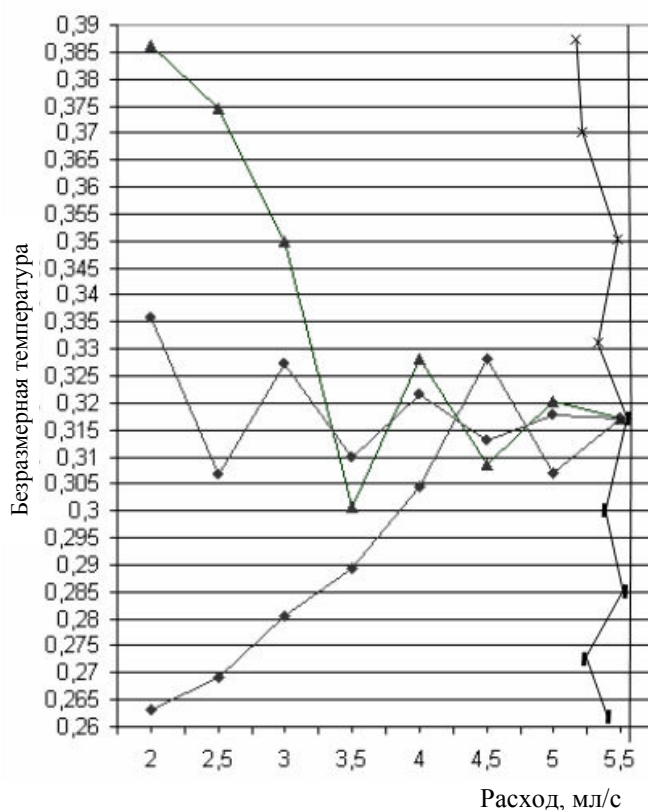


Рис. 3 Поиск градиентным методом оптимальных параметров процесса измерения коэффициента температуропроводности воды

Таким образом, при поддержании указанных значений этих параметров погрешность измерения температуропроводности будет минимальной, а, следовательно, качество процесса измерения будет повышаться.

Заключение

Изложенные в статье результаты исследований позволяют определить оптимальные параметры процесса измерения коэффициента температуропроводности любой исследуемой жидкости, и, поддерживая эти параметры на заданном уровне, свести погрешность измерения к минимуму. Следовательно, с применением подходов Тагути, можно улучшать качество (точность) процесса измерения коэффициента температуропроводности без дополнительных затрат на улучшение оборудования.

Список литературы

- 1 Леон, Р. Управление качеством. Робастное проектирование. Метод Тагути : пер с англ. / Р. Леон, А. Шумейкер, Р. Какар, Л. Кац, М. Фадке, Г. Тагути, Д. Спини, М. Грико, К. Лин, У. Назарет, У. Клиндер, В. Нэйр, К. Дехнад, Д. Прегибон. – М.: СЕЙФИ, 2002. – 384 с.

2 Пономарев, С.В. Методы и устройства для измерения эффективных теплофизических характеристик потоков технологических жидкостей / С.В. Пономарев, С.В. Мищенко. – Тамбов: Тамбовск. госуд. техн. ун-т, 1997. – 249 с.

3 Петухов, Б.С. Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах / Б.С. Петухов. – М.: Энергия, 1967. – 411 с.

4 Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик. – М.: Наука, 1972. – 720 с.

5 Пономарев, С.В. Управление качеством продукции. Введение в системы менеджмента качества : учебн. пособие / С.В. Пономарев, С.В. Мищенко, В.Я. Белобрагин. – М.: РИА «Стандарты и качество», 2004. – 248 с.

6 Пономарев, С.В. Управление качеством продукции. Инструменты и методы менеджмента качества : учебн. пособие / С.В. Пономарев, С.В. Мищенко, В.Я. Белобрагин, В.А. Самородов, Б.И. Герасимов, А.В. Трофимов, С.А. Пахомова, О.С. Пономарева. – М.: РИА «Стандарты и качество», 2005. – 248 с.

7 <http://www.ict.nsc.ru/rus/textbooks/akhmerov/mo/3.html#Item3>.

The Choice of Optimum Parameters of Measuring the Thermal Diffusivity Coefficient by Laminar Mode Method

S.V. Ponomarev, S.A. Malyutina

Tambov State Technical University

Key words and phrases: measuring; thermal diffusivity coefficient; laminar mode method; optimum mode parameters; robust designing.

Abstract: Application of robust designing method of Genitti Tagutti for improvement of metrological characteristics of measuring thermal diffusivity coefficient by laminar mode method is studied. The selection of optimum mode parameters of the given process so as to reduce inaccuracy and improve the measurement quality is made.

© С.В. Пономарев, С.А. Малютина, 2006