

10. Drakhlis B. Calculate Oscillator Jitter by Using Phase-Noise Analysis // Microwaves & RF. 2001. V. 157. P. 82—90.

11. Телешевский В. И., Гришин С. Г. Цифровая обработка измерительных сигналов гетеродинных лазерных интерферометров с использованием программируемой логики // Труды междунар. науч.-техн. интернет-конф. «Нанотехнология — технология XXI века». М.: Изд-во МГОУ, 2004. С. 17—28.

12. Teleshevsky V. I., Grishin S. G. Digital transformations of the phase measurement information in the high resolution heterodyne laser interferometry // Proc. SPIE. 2008. V. 7006. P. 70060E-1-70060E-7.

13. Чмых М. К. Цифровая фазометрия. М.: Радио и связь, 1993.

Дата принятия 24.09.2013 г.

ЛИНЕЙНЫЕ И УГЛОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

62.503.51

Метрологический анализ системы управления нанесением покрытий на внутреннюю поверхность труб

Б. В. СКВОРЦОВ, М. И. ЗАРЕЦКАЯ, С. А. БОРМИНСКИЙ

Самарский государственный аэрокосмический университет им. ак. С. П. Королева, Самара, Россия, e-mail: b80@ssau.ru

Рассмотрен способ нанесения защитного покрытия (шликера) на внутреннюю поверхность труб. Исследованы погрешности, характеризующие на равномерность толщины покрытия, и приведены методики их расчета численными и аналитическими методами.

Ключевые слова: защитное покрытие, внутренняя поверхность, равномерность толщины, методики расчета.

The method of tubes inner surface enamel coating is considered. The errors affecting the coating thickness uniformity have been studied and the procedures of their calculation by numerical and analytical methods are presented.

Key words: surface coating, inner surface, thickness uniformity, calculation procedures.

В статье рассмотрен способ нанесения защитного покрытия (шликера) на внутреннюю поверхность труб [1] и различные конструктивные решения, связанные с его реализацией [2, 3]. Базовая структурная схема реализации способа показана на рис. 1. Покрытие наносят путем управляемого движения шликера внутри трубы. Сначала через впускной вентиль 1 в трубу 2 закачивают шликер, затем его сливают через шланговую задвижку 6. Датчик уровня 3 измеряет текущее значение уровня шликера в трубе. По команде модуля обработки информации 4 электропривод 5 управляет задвижкой 6 таким образом, чтобы стабилизировать скорость движения шликера в трубе, что обеспечивает равномерность нанесения покрытия на ее внутренней стенке.

Теоретические проблемы, связанные с процессом регулирования нанесения покрытия, изложены в [4—6]. Толщина покрытия D в зависимости от скорости движения шликера v и его температуры T может быть представлена функцией, задаваемой таблично в виде двумерного массива:

$$D = F(v, T). \quad (1)$$

В общем случае, если функция (1) известна, то абсолютную погрешность измерений вычисляют по формуле

$$\Delta D = [\partial F(v, T)/\partial v] \Delta v + [\partial F(v, T)/\partial T] \Delta T. \quad (2)$$

Выражение (2) определяет абсолютную суммарную погрешность системы, его первое слагаемое — основную погрешность, связанную с неточностью поддержания требуемой скорости движения шликера, а второе — дополнительную погрешность из-за неточности поддержания температуры в технологическом режиме.

Для оценки суммарной погрешности предложены два метода:

численный, основанный на конечно-разностных вычислениях (2) по таблично заданной функции $F(v, T)$;

аналитический, когда (1) описывается аналитически, следовательно, (2) будет иметь конкретный вид.

Численный метод определения суммарной погрешности. В этом случае функция (1) задана в виде двумерного массива

$$D_{i,j} = F(v_i, T_j),$$

где $i = 1...N$; $j = 1...M$; N, M — общее число отсчетов по скорости и температуре, соответственно.

В конечно-разностном виде (2) примет вид

$$\Delta D_{i,j} = \Delta v(D_{i+1,j} - D_{i,j})/(v_{i+1} - v_i) + \Delta T(D_{i,j+1} - D_{i,j})/(T_{j+1} - T_j), \quad (3)$$

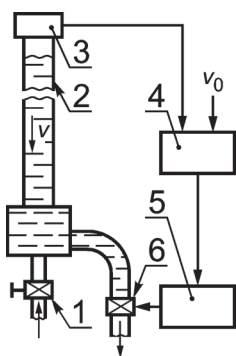


Рис. 1. Структурная схема системы управления нанесением покрытия на внутреннюю поверхность труб:

1 — впускной клапан; 2 — обрабатываемая труба; 3 — датчик уровня материала в трубе; 4 — модуль обработки информации и управления; 5 — электропривод; 6 — шланговая задвижка

что позволяет вычислить ΔD толщины покрытия при отклонениях от заданного технологического режима на Δv , ΔT . Если конечно-разностная сетка равномерна по скорости и температуре, то $v_{i+1} - v_i = h_v$, $T_{j+1} - T_j = h_T$ и формулу (3) запишем так

$$\Delta D_{i,j} = \Delta v (D_{i+1,j} - D_{i,j}) / h_v + \Delta T (D_{i,j+1} - D_{i,j}) / h_T, \quad (4)$$

где h_v , h_T — шаги сетки по скорости и температуре, соответственно.

Равенство (4) верно, если $|\Delta v| \leq h_v$, $|\Delta T| \leq h_T$.

Если шаг сетки неравномерный, то для вычисления погрешности следует использовать формулу (3), справедливую при следующих условиях:

$$|\Delta v| \leq \min |(v_{i+1} - v_i)|,$$

$$|\Delta T| \leq \min |(T_{j+1} - T_j)|. \quad (5)$$

При конкретных вычислениях погрешностей, связанных с отклонениями технологического режима от идеального, значения $D_{i,j}$ соответствуют эталонному технологическому режиму, обеспечивающему заданную толщину покрытия D_0 . Совокупность параметров (i, j) следует понимать как индекс технологического режима.

Отметим, что погрешности от изменения скорости и температуры могут взаимно компенсироваться.

В таблице приведен пример задания функции (1).

В каждой ячейке записана толщина $D_{i,j}$ покрытия, соответствующая комбинации температуры T_j и скорости движения шликера v_i внутри трубы. Такую таблицу получает технолог для каждой марки шликера и каждого типа трубы индивидуально. Тип трубы определяется размерами (длиной, диаметром) и материалом.

Например, нужно нанести покрытие толщиной $D_0 = 285$ мкм. Из табл. 1 выбираем технологический режим $(i, j) = (3; 3)$, соответствующий $v_3 = 0,15$ м/с, $T_3 = 19$ °C, $D_{3,3} = D_0 = 285$ мкм. При этом $h_v = 0,05$ м/с, $h_T = 1$ °C. Если технологический режим отклонился от заданного на $\Delta v = 0,04$ м/с и $\Delta T = -0,3$ °C,

что удовлетворяет условиям (5), то по (4) определяем ΔD толщины пленки для выбранного технологического режима $(i, j) = (3; 3)$:

$$\Delta D_{3,3} = \Delta v (D_{4,3} - D_{3,3}) / h_v + \Delta T (D_{3,4} - D_{3,3}) / h_T = 18 \text{ мкм}.$$

Отметим, что технолог может выбрать другой режим, например $(i, j) = (4; 2)$. В этом случае при тех же отклонениях $\Delta D_{4,2} = 14$ мкм.

Предложенная методика дает возможность определять погрешность при любых выбранных технологических режимах нанесения покрытия при заданных отклонениях от него по скорости слива и температуре. Методом численного моделирования технолог может вычислять допустимые отклонения Δv , ΔT , при которых погрешность не превысит допустимого значения.

Недостатки численного метода (алгоритма) анализа погрешности:

не получается в явном виде определять максимально допустимые отклонения от технологического режима по скорости и температуре при заданной допустимой погрешности толщины покрытия;

невозможно оценить распределение погрешности по длине трубы и динамическую погрешность, связанную с переходными процессами в начале и конце трубы.

Аналитический метод определения погрешности. Общий математический подход состоит в аппроксимации технологической таблицы двумерной аналитической функцией и по (2); получении прямых аналитических выражений, связывающих погрешность ΔD толщины покрытия с отклонениями от технологического режима. Кроме наглядности, это дает возможность исследовать распределение ΔD по длине трубы и рассмотреть динамические погрешности, связанные с нарастанием и спадом скорости слива в начале и конце трубы, используя формулу:

$$\Delta D(H) = D_0 - D_p = F(v_0, T_0) - F(v_p(H), T_p(H)),$$

где D_0 — эталонная (или заданная) толщина покрытия, являющаяся функцией от эталонных v_0 и T_0 ; D_p — реальная толщина покрытия, которая является функцией от реальных v_p и T_p , в свою очередь, зависящих от высоты столба шликера.

При аналитическом методе можно разделить погрешности на основные и дополнительные. Под основными следует понимать методическую и инструментальную погрешности.

Методическая погрешность определяется погрешностью функции, описывающей технологический режим нанесения покрытия, т. е. функции (1), связывающей D со скоростью движения. Данная зависимость является эмпирической, зависит от марки шликера, размеров и материала трубы и ее погрешность не поддается численной оценке. Перед обработкой каждой партии труб технолог, используя предварительные данные из таблицы, под конкретные усло-

Пример технологической таблицы

Скорость v_i , м/с	$D_{i,j}$ при различных температурах T_j , °C					
	$T_1 = 17$	$T_2 = 18$	$T_3 = 19$	$T_4 = 20$	$T_5 = 21$	$T_6 = 22$
$v_1 = 0,05$	$D_{1,1} = 165$	$D_{1,2} = 182$	$D_{1,3} = 200$	$D_{1,4} = 220$	$D_{1,5} = 245$	$D_{1,6} = 262$
$v_2 = 0,1$	$D_{2,1} = 215$	$D_{2,2} = 235$	$D_{2,3} = 255$	$D_{2,4} = 275$	$D_{2,5} = 295$	$D_{2,6} = 315$
$v_3 = 0,15$	$D_{3,1} = 245$	$D_{3,2} = 265$	$D_{3,3} = 285$	$D_{3,4} = 305$	$D_{3,5} = 325$	$D_{3,6} = 345$
$v_4 = 0,2$	$D_{4,1} = 260$	$D_{4,2} = 280$	$D_{4,3} = 300$	$D_{4,4} = 320$	$D_{4,5} = 340$	$D_{4,6} = 360$
$v_5 = 0,25$	$D_{5,1} = 270$	$D_{5,2} = 290$	$D_{5,3} = 310$	$D_{5,4} = 330$	$D_{5,5} = 350$	$D_{5,6} = 370$
$v_6 = 0,3$	$D_{6,1} = 275$	$D_{6,2} = 295$	$D_{6,3} = 315$	$D_{6,4} = 335$	$D_{6,5} = 355$	$D_{6,6} = 375$

вия на установке подбирает эталонный режим обработки (скорость движения шликера и его температуру). Отметим, что выбор температуры во многом определяется текущей температурой в цехе и в резервуаре хранения шликера. Таким образом, методическая погрешность эмпирическим путем минимизируется и не поддается количественной оценке.

Другое дело инструментальная погрешность, под которой следует понимать погрешность, связанную с отклонением реальной скорости движения шликера v_p от эталонной v_0 , определенной технологом на установке. Фактически — это погрешность поддержания технологического режима по скорости при фиксированной температуре. Она полностью определяется устройством управления, применяемым оборудованием и алгоритмом управления, поэтому отнесена к основной, в частности, инструментальной погрешности устройства.

При фиксированной температуре T_j зависимость D от v с достаточно высокой степенью точности можно представить в виде полинома, полученного в результате аппроксимации функции (1):

$$D = F(v, T_j) \approx \sum_{k=0}^n (a_k v_{T_j}^k) \approx a_0 + a_1 v_{T_j} + a_2 v_{T_j}^2 + \dots + a_n v_{T_j}^n, \quad (6)$$

где v_{T_j} — скорость слива при фиксированной температуре T_j .

Аппроксимацию зависимости (1) можно проводить любым набором функций заданного вида, в том числе ортогональными функциями Чебышева, Лагера, Лежандра, Фурье и др. Однако учитывая, что функция (1) монотонно гладкая, при аппроксимации ограничиваются простым степенным полиномом (6). Погрешность определяется степенью n и с точностью до 0,01 обеспечивается четырьмя членами разложения.

Для абсолютного значения основной погрешности, определяемой при фиксированной температуре T_j , можно записать

$$\begin{aligned} \Delta D &= \frac{\partial F(v, T_j)}{\partial v} \Delta v_{T_j} \approx \sum_{k=1}^n (k a_k v_{T_j}^{k-1}) \Delta v_{T_j} \approx \\ &\approx (a_1 + 2a_2 v_{T_j} + \dots + n a_n v_{T_j}^{n-1}) \Delta v_{T_j}. \end{aligned} \quad (7)$$

Если при температуре T_j задана эталонная скорость технологического режима слива $v_0 = v_{T_j}$ и максимально допустимая погрешность ΔD_m , то допустимое отклонение от технологического режима по скорости определяется как

$$\Delta v_{0, T_j} \leq \Delta D / \sum_{k=1}^n (k a_k v_{T_j}^{k-1}) = \Delta D_m / \sum_{k=1}^n (k a_k v_0^{k-1}). \quad (8)$$

Рассмотрим пример расчета погрешностей. Из таблицы выбираем технологический режим $(i, j) = (3; 3)$. По (6) для четырех членов разложения находим

$$D = F(v, T_j) \approx 116,667 + 2020 v_{T_j} - 7413 v_{T_j}^2 + 9630 v_{T_j}^3,$$

а по (7) при $\Delta v_{T_j} = 0,04$ м/с получаем $\Delta D = 17,845$ мкм.

При $\Delta D_m = 20$ мкм требования к стабильности технологического режима по скорости определяем по (8): $\Delta v_{0, T_j} \leq 0,0448$ м/с.

Предложенная методика позволяет получить расчетные соотношения для вычисления основной погрешности, связанной с обеспечением стабильной скорости технологического режима при фиксированной температуре.

К основной следует отнести погрешность, связанную с чувствительностью датчика высоты столба жидкости. Оценим влияние мультипликативной погрешности датчика высоты на общую погрешность поддержания скорости v_{T_j} и определим требования к его метрологическим характеристикам. Основная статическая мультипликативная погрешность датчика Δk_d определяется отличием реального значения коэффициента k_d от эталонного $k_d^{\text{эт}}$, т. е. $\Delta k_d = k_d - k_d^{\text{эт}}$.

В результате исследований найдена связь между Δv_{T_j} и Δk_d при прочих других эталонных условиях. Изменение чувствительности датчика высоты (коэффициента преобразования k_d) в пределах $\pm 0,5$ % от номинального значения (мультипликативная погрешность) приводит к отклонению скорости не более чем на 1 %. При этом на малых скоростях чувствительность датчика высоты практически не влияет на скорость движения.

К дополнительным относятся температурная погрешность ΔD_T , определяемая вторым слагаемым в (2):

$$\Delta D_T = \Delta T [\partial F(v, T) / \partial T].$$

Учитывая, что (1) является эмпирически полученной функцией, воспользуемся ранее предложенной методикой и проведем ее аппроксимацию при фиксированной скорости v_i :

$$D = F(v_i, T) \approx \sum_{k=0}^n (b_k T_i^k) \approx b_0 + b_1 T_{v_i} + b_2 T_{v_i}^2 + \dots + b_n T_{v_i}^n. \quad (9)$$

На практике оказалось достаточным использование трех членов разложения. По аналогии с (7) запишем

$$\begin{aligned} \Delta D_T &= \frac{\partial F(v_i, T)}{\partial T} \Delta T_{v_i} \approx \sum_{k=1}^n (k b_k T_{v_i}^{k-1}) \Delta T_{v_i} \approx \\ &\approx (b_1 + 2b_2 T_{v_i} + \dots + n b_n T_{v_i}^{n-1}) \Delta T_{v_i}. \end{aligned} \quad (10)$$

Для технологического режима из таблицы $(i, j) = (3; 3)$ по (9) находим

$$D = -95 + 20 \cdot T - 5,506 \cdot 10^{-14} \cdot T^2.$$

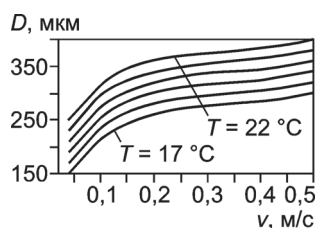


Рис. 2. Пример представления технологической таблицы в виде графиков

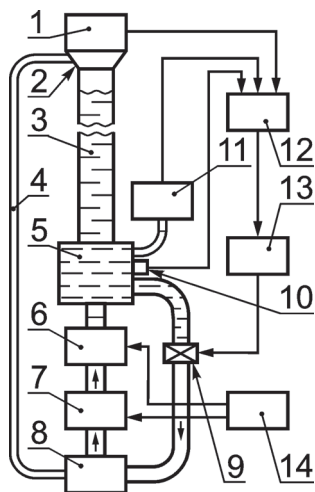


Рис. 3. Структурная схема устройства нанесения покрытия:

1 — акустический датчик уровня; 2 — переходная насадка; 3 — обрабатываемая труба; 4 — гидравлический канал; 5 — коллектор; 6 — отсекающий клапан; 7 — насосный агрегат; 8 — реактор; 9 — сливная задвижка; 10 — датчик температуры; 11 — гидро-статический датчик уровня; 12 — микропроцессорное устройство обработки и управления; 13 — электро-механический привод; 14 — блок управления насосным агрегатом

ры зависит установочное значение скорости v_0 , приводящее к стабилизации D . При номинальной температуре $T_{i,j} = T_p = 18\text{ °C}$ получаем $v_0' = v_0 = 0,3\text{ м/с}$. При изменении температуры автоматически изменяется установочное значение.

Погрешность аппроксимации составила менее 1 %.

Температурную погрешность при $\Delta T_{vi} = -0,3\text{ °C}$ определяем по (10): $\Delta D_T = 6\text{ мкм}$.

Из графиков на рис. 2 следует, что средние коэффициенты влияния температуры на скорость движения шликера в трубе $k_v = 2,6 \cdot 10^{-4}\text{ (м/с) · °C}$, а на толщину покрытия $k_D = 20\text{ мкм/°C}$. Данные коэффициенты используют для компенсации температурной погрешности.

На основе проведенных исследований можно предложить конструктивный метод улучшения качества наносимого покрытия, показанный на рис. 3. Одна из важнейших погрешностей — температурная может быть скомпенсирована путем введения в систему управления датчика температуры 10, устанавливаемого в коллекторе 5. Контроль температуры позволяет оперативно изменять скорость движения шликера с целью обеспечения постоянства толщины D покрытия. Контроль уровня одновременно двумя датчиками — акустическим 1 и гидро-статическим 11 позволяет снизить погрешности его измерения и вычисления скорости движения жидкости на границах трубы. Реактор 8 предназначен для подготовки шликера.

Результаты компьютерного моделирования системы, проведенные в программе Mathlab-simulink [5—7], представлены на рис. 4. Из графиков следует, что от температу-

Так, $v_0' = 0,27\text{ м/с}$ при $T_p = 17\text{ °C}$,

$v_0' = 0,39\text{ м/с}$ при $T_p = 20\text{ °C}$.

Также определено, что при постоянной температуре скорость должна поддерживаться с погрешностью 4 % для обеспечения толщины покрытия с погрешностью 10 %.

Проведенные метрологические исследования позволили определить влияние элементов системы на качество покрытия, тем самым сформулировав требования к ним. Результаты теоретических исследований подтверди-

лись экспериментами на макетном и опытном образцах, внедренных на технологическом участке ОАО «Негаспензапром», эксплуатация которых позволила достичь неравномерности внутреннего покрытия трубы не превышающей $\pm 5\%$ [7].

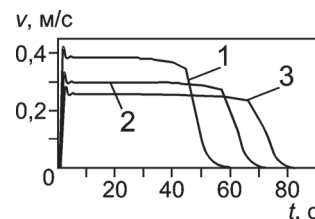


Рис. 4. Зависимость скорости движения шликера от времени слива при разных температурах для обеспечения постоянной толщины покрытия 295 мкм для технологического режима $(i, j) = (3; 3)$:

1 — $T_p = 20\text{ °C}$, $v_0' = 0,39\text{ м/с}$;
2 — $T_p = 18\text{ °C}$, $v_0' = 0,3\text{ м/с}$;
3 — $T_p = 17\text{ °C}$, $v_0' = 0,27\text{ м/с}$

Литература

1. Пат. 2488450 РФ. Способ нанесения покрытия на внутреннюю поверхность трубы / Б. В. Скворцов и др. // Изобретения. Полезные модели. 2011. № 21.
2. Пат. 96793 РФ. Устройство нанесения покрытия на внутреннюю поверхность трубы / Б. В. Скворцов, С. А. Борминский, М. И. Голикова // Изобретения. Полезные модели. 2010. № 23.
3. Пат. 106850 РФ. Устройство нанесения изолирующих покрытий на внутреннюю поверхность трубы / Б. В. Скворцов, С. А. Борминский, М. И. Голикова // Изобретения. Полезные модели. 2011. № 21.
4. Воронин В. И. Изоляционные покрытия подземных нефтегазопроводов. М.: ВНИИОЭНГ, 1990.
5. Кузнецов М. В. Противокоррозионная защита трубопроводов и резервуаров. М.: Недра, 1992.
6. Скворцов Б. В., Голикова М. И. Компьютерное моделирование системы автоматического управления нанесением покрытия на внутреннюю поверхность трубы / Матер. науч.-практ. конф. «Moderni vymoženosti vědy». Прага, 2013. С. 83—88.
7. Скворцов Б. В. и др. Экспериментальные исследования системы автоматического нанесения покрытия на внутреннюю поверхность трубы // Информационные, измерительные и управляющие системы. 2012. № 12. С. 27—32.

Дата принятия 06.11.2013 г.