

И.В. Штенников, Т.А. Инкин
(г. Ижевск, ИжГТУ имени М.Т. Калашникова)

ПРОГРАММА МОДЕЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ КОНДЕНСАЦИИ ХРОМОВЫХ ПОКРЫТИЙ В ВАКУУМЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РЕЖИМОВ ИХ ФОРМИРОВАНИЯ

**PROGRAM FOR MODELING THE CONDENSATION RATE OF CHROME COATING
IN VACUUM DEPENDING ON THE MODES OF ITS FORMATION**

На основе математической модели процесса массопереноса при вакуумном нанесении покрытий на трубчатые изделия разработана программа моделирования скорости конденсации хромовых покрытий в зависимости от режимов и условий их формирования.

Based on a mathematical model of the mass transfer process during vacuum coating of tubular products, a program has been developed for modeling the rate of condensation of chrome coatings depending on the modes and conditions of their formation.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, вакуумные покрытия, скорость конденсации, режимы нанесения, термическое испарение.

Keywords: computer modelling, vacuum coatings, rate of condensation, application process, thermal transpiration.

При разработке современных технических систем широко используются различные программные продукты компьютерного моделирования. Зарубежные, это Simulink, Skilab, MATRIXX, VisSim, LabVIEW и др., отечественные: МИК, ПА 9, CLASSIC, МВТУ, SimInTech и др. [1]. Для расширения их возможностей они постоянно совершенствуются, обновляются, пополняются новыми базами данных, приложениями, библиотеками. Наряду с этим разрабатываются новые алгоритмы, программы моделирования физических процессов, технических систем, для которых математические модели еще в полной мере не составлены. К числу таких процессов можно отнести нанесение металлических конденсационных покрытий в вакууме на внутреннюю поверхность трубчатых изделий [2].

При разработке математического описания данного процесса в работе [3] рассмотрены явления массопереноса вещества при вакуумном конденсационном нанесении покрытий на внутреннюю поверхность трубчатых изделий с соосно расположенного стержневого резистивного испарителя; согласно классической теории состояния идеального газа и теории испарения [4] разработана математическая модель; составлен алгоритм и программа расчета скорости конденсации хромового покрытия на внутренней поверхности трубчатого изделия в зависимости от режимов и условий его формирования [5, 6]. Погрешность расчёта не превышает 10% [3].

Для более полного использования возможностей полученной модели целесообразно разработать программу моделирования скорости конденсации

хромовых покрытий в вакууме на трубчатые изделия, позволяющую в едином массиве выходных данных представить закономерности изменения скорости конденсации покрытия в зависимости от режимов и условий его формирования. В связи с этим усовершенствованы алгоритм и программа расчета скорости конденсации покрытия. На рис. 1 приведена блок схема алгоритма.

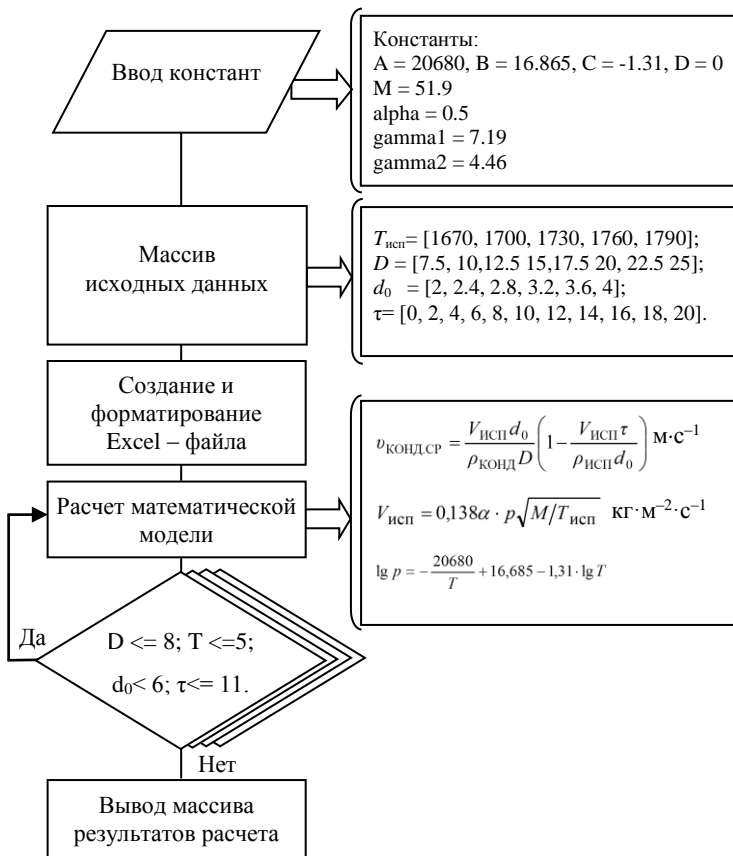


Рис. 1. Алгоритм моделирования скорости конденсации хромовых покрытий в вакууме на трубчатые изделия в зависимости от режимов их формирования.

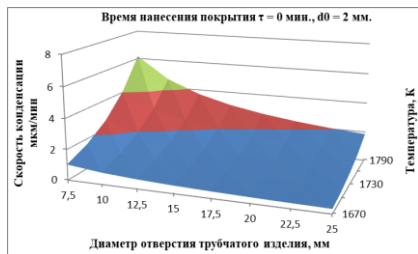
Программа составлена на языке Python 3.8, включает: ввод констант, массив исходных данных, вычисление на основе уравнений давления паров хрома и скорости конденсации покрытия в зависимости от режима испарения и условий формирования покрытия; вывод численных результатов моделирования в виде массива таблиц Excel и представление результатов в виде графиков, гистограмм и др. инструментов Excel. Фрагмент массива выходных данных приведен на рис. 2.

tau = 0, diam0 = 2								
	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25
1670	1,032138	0,774104	0,619283	0,516069	0,442345	0,387052	0,344046	0,309641
1700	1,652988	1,239741	0,991793	0,826494	0,708424	0,619871	0,550996	0,495897
1730	2,60296	1,95222	1,561776	1,30148	1,115554	0,97611	0,867653	0,780888
1760	4,033762	3,025322	2,420257	2,016881	1,728755	1,512661	1,344587	1,210129
1790	6,156752	4,617564	3,694051	3,078376	2,638608	2,308782	2,052251	1,847025
tau = 2, diam0 = 2								
	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25
1670	1,025698	0,769274	0,615419	0,512849	0,439585	0,384637	0,341899	0,307709
1700	1,63647	1,227353	0,981882	0,818235	0,701344	0,613676	0,54549	0,490941
1730	2,562	1,9215	1,5372	1,281	1,098	0,96075	0,854	0,7686
1760	3,935396	2,951547	2,361238	1,967698	1,686598	1,475774	1,311799	1,180619
1790	5,927597	4,445698	3,556558	2,963799	2,540399	2,222849	1,975866	1,778279

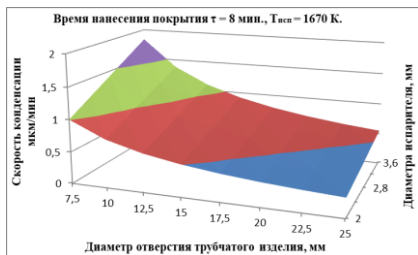
Рис. 2. Фрагмент массива результатов расчета $v_{\text{конд}} = f(T_{\text{исп}}, D)$ в начальный момент времени нанесения покрытия, $\tau = 0$ и $\tau = 2$ мин. при $d_0 = 2$ мм

Расчет скорости конденсации хромовых покрытий производился для наиболее характерных режимов вакуумного хромирования трубчатых изделий [7, 8]: температуре испарения $T_{\text{исп}} = 1670 \dots 1790$ К, диаметре отверстия трубчатого изделия $D = 7,5 \dots 25$ мм, начальном диаметре испарителя $d_0 = 2,0 \dots 4,0$ мм и длительности нанесения покрытия $\tau = 0 \dots 20$ мин.

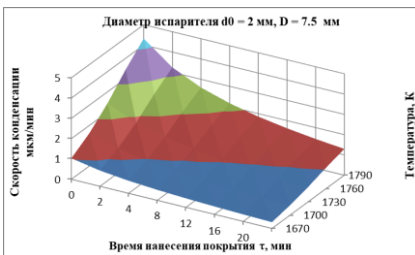
На рис. 3 приведены результаты математического моделирования в виде графиков Excel, которые демонстрируют изменение скорости конденсации хромовых покрытий $v_{\text{конд.ср}}$ в зависимости от режимов и условий их формирования: температуры испарения $T_{\text{исп}}$, диаметра отверстия трубчатого изделия D , начального диаметра испарителя d_0 и длительности нанесения покрытия τ .



а)



б)



в)

Рис. 3. Зависимость скорости конденсации хромового покрытия от режимов его формирования

Таким образом, разработанная программа позволяет методом математического моделирования представить закономерность и провести анализ изменения скорости конденсации хромового покрытия на внутренней поверхности трубчатого изделия в едином массиве выходных данных в зависимости от различных режимов и условий формирования покрытия методом термического испарения в вакууме с соосно-расположенного стержневого резистивного испарителя.

Список литературы

1. *Карташов, Б.А.* Среда динамического моделирования технических систем SimInTech/ *Б.А. Карташов, Е.А. Шабаев, О.С. Козлов, А.М. Щекатуров.* – М.: ДМК Пресс, 2017. – 424 с.
2. Патент № 1487486 Российская Федерация, МКИ С23С 14/00. Устройство для нанесения покрытий на внутреннюю поверхность длинномерных изделий: № 4107792/24-21: заявл. 04.06.86 / *В.И. Сидоренко, И.В. Штенников, А.Б. Яриков.*
3. *Инкин, Т.А.* Математическая модель прогнозирования скорости формирования конденсационного покрытия при термическом испарении в вакууме / *Т.А. Инкин, И.В. Штенников* // САПР и моделирование в современной электронике: сб. материалов III Междунар. науч.-практ. конф., 24-25 октября 2019 г. – Брянск: БГТУ, тип. «Карат», 2019. – С.175-178. – DOI: 10.30987/conferencearticle_5e0282122f44/32093157.
4. Технология тонких пленок. Справочник / под ред. Л.Майссела, Р. Глэнга. –М.: Сов. радио, 1977.
5. *Инкин, Т.А.* Алгоритм и программа анализа скорости конденсации хромовых покрытий на внутренней поверхности трубчатых изделий в зависимости от условий испарения и конденсации / *Т.А. Инкин, И.В. Штенников* // «Молодежь и научно-технический прогресс»: сб. докладов XIII Междунар. науч.-практ. конф. студ. аспирант. и молод. учен., 9 апр. 2020г. – Губкин; Старый Оскол: ООО «Ассистент плюс», 2020.– Т.1. – С.100-105.
6. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2020613299. Программа расчета скорости конденсации хромового покрытия на внутренней поверхности полого изделия при термическом испарении материала с соосно расположенного стержневого испарителя / *В.И. Сидоренко, И.В. Штенников, Т.А. Инкин.*– № 2020612179; Заявл. 27.02.2020. Гос. регистрации 12.03.2020.
7. *Сидоренко, В.И.* Конусообразные кристаллиты в структуре хромовых покрытий / *В.И. Сидоренко, И.В. Штенников* // Приборостроение в XXI веке. Интеграция науки, образования и производства: Труды научно-технической конференции. – Ижевск: Изд. дом «Удмуртский университет», 2001.–С.48–52.
8. *Сидоренко, В.И.* К вопросу о слоистом строении вакуумных конденсатов хрома / *В.И. Сидоренко, И.В. Штенников* // Вестник ИжГТУ. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2007. – №1(33) – С. 50-53.

Материал поступил в редколлегию 12.10.20.