

УДК 622.276.001

В.П. Первадчук¹, Д.Б. Владимирова², А.А. Пестерев³

^{1,2}Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

³ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания»,
Пермь, Россия

АЛГОРИТМ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЕ ПОДВИЖНЫМ ИСТОЧНИКОМ ТЕПЛООВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Рассматриваются вопросы математического обеспечения системы оптимального управления подвижным источником теплового воздействия в процессе легирования по технологии MCVD (modified chemical vapor deposition). Математическое обеспечение системы оптимального управления рассматривается как часть программно-технического комплекса, адаптированного в систему управления существующего станка MCVD. Объектом исследования является автоматизированный технологический процесс производства заготовок оптических волокон по технологии MCVD. Цель работы заключается в разработке алгоритма управления подвижным источником теплового воздействия. Предложенный алгоритм управления основан на теории оптимального управления. Наличие вычислителя системы дифференциальных уравнений в структуре алгоритма, моделирующего состояние объекта управления, позволяет рассчитать поправки к закону управления и стабилизировать температурное поле на поверхности кварцевой трубы в режиме реального времени.

В работе рассмотрены программные модули, на основе которых реализован алгоритм управления. Центральным модулем в реализации проектируемой системы управления является пакет MatLab. Основные задачи алгоритма: аппроксимация данных полиномиальной функцией и решение системы уравнений реализуются с помощью набора стандартных функций MatLab. В текущей задаче MatLab обеспечивает двустороннюю связь со SCADA-системой станка MCVD, с одной стороны, получает величины фактических параметров процесса MCVD, с другой стороны, передает рассчитанную величину поправки для корректировки закона управления. Для осуществления двусторонней связи между SCADA-системой и пакетом MatLab разработан протокол взаимодействия для обмена ключевыми параметрами процесса, необходимыми для реализации алгоритма управления.

Рассматриваемый алгоритм управления позволяет сократить технологический отход в процессе изготовления изделий по технологии MCVD за счёт оптимального управления температурным полем.

Ключевые слова: алгоритм, газовая горелка, кварцевая труба, математическая модель, оптимальное управление, оптическое волокно, подвижный тепловой источник, процесс MCVD, система, температурное поле, функция, MatLab.

V.P. Pervadchuk¹, D.B. Vladimirova², A.A. Pesterev³

^{1,2}Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

³Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company, Perm, Russian Federation

ALGORITHM FOR OPTIMAL CONTROL OF MOBILE HEAT SOURCE

The present paper examines the matter of use of mathematical software for a system of optimal control of a moving heat source during the MCVD doping process. The mathematical software here is regarded as a part of software embedded into the control system of the MCVD machine. The subject of research is an automated process of fabrication of fiber preforms using the MCVD technology. The objective of the paper is to develop a control algorithm for the moving heat source. The suggested algorithm is based on the optimal control theory. The presence of a differential equation computer in the algorithm which simulates condition of the object of control allows for calculation of corrections for the control law and stabilization of a thermal field on the surface of the quartz tube in real time.

This paper examines software modules which serve as a basis for implementation of the control algorithm. The central module of the designed control system is Matlab software. Main tasks of the algorithm – approximation of polynomial function data and solution of a system of equations – are implemented through a basic set of MatLab tools. In the task at hand, MatLab provides bidirectional communication with a SCADA system of the MCVD tool, receiving values of actual parameters of the MCVD process from on end, and sending the calculated correction value to adjust the control law to the other end. To ensure bidirectional communication between SCADA and MatLab, a communication protocol has been developed to exchange key process parameters, needed for the control algorithm.

The control algorithm in question allows reduction of rejects by optimally controlling the thermal field during the MCVD fabrication process.

Keywords: algorithm, gas burner, quartz pipe, mathematical model, optimal control, optical fiber, mobile heat source, MCVD process, system, thermal field, function, MatLab.

Введение. Реализация оптимального управления является индикатором развитости современного производства. Математический аппарат оптимального управления хорошо изучен и существует уже несколько десятков лет [1–6], однако вопросы построения и внедрения таких систем управления ограничиваются сложностями технической реализации. В данной работе рассматривается задача оптимального управления температурным полем кварцевой трубы при легировании по технологии MCVD [7–12]. В качестве управления выбрана интенсивность (мощность) подвижного теплового источника [13–14] – газовой горелки.

1. Математическое обеспечение системы управления. Совокупность математических методов и алгоритмов формирует математическое обеспечение системы управления. Математические модели, положенные в основу проектируемой системы управления, и обоснованность их использования представлены в работах [15–19], в которых функция подвижного теплового источника имеет вид:

$$q(t, z) = q_{\max} \cdot e^{-\left(\frac{z - \int_0^t v(\xi) d\xi}{H} \right)^2}, \quad (1)$$

где $q(z, t)$ – тепловой поток от газовой горелки, $v(\xi)$ – скорость движения горелки, H – дисперсия (параметр формы пламени горелки), q_{\max} – мощность горелки, t – время, z – пространственная переменная. Результаты моделирования и экспериментальных исследований должны быть пояснены подробно.

Будем полагать, что известно программное движение (состояние), т.е. известны температура $T^*(t, z)$ и управление $u^*(t, z)$. Однако реальное (истинное) состояние системы всегда будет отличаться от программного. Поэтому можно записать, что

$$T(t, z) = T^*(t, z) + \Delta T(t, z), \quad (2)$$

$$u(t, z) = u^*(t, z) + \Delta u(t, z), \quad (3)$$

где $T(t, z)$ и $u(t, z)$ – реальное состояние системы; $\Delta T(t, z)$ и $\Delta u(t, z)$ – возмущения (отклонение реального состояния от программного). Тогда уравнение теплообмена возмущенного состояния примет вид:

$$\frac{\partial \Delta T}{\partial t} - a \frac{\partial^2 \Delta T}{\partial z^2} + \alpha \frac{\partial \Delta T}{\partial z} + \beta \Delta T = \gamma \Delta u, \quad (4)$$

а система оптимальности запишется так [17]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Delta T}{\partial t} - a \frac{\partial^2 \Delta T}{\partial z^2} + \alpha \frac{\partial \Delta T}{\partial z} + \beta \Delta T = -\frac{\gamma^2 p}{\sigma}, \\ \frac{\partial p}{\partial t} + a \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + \alpha \frac{\partial p}{\partial z} - \beta p = -\Delta T, \\ \Delta T|_{t=0} = T_0(z), p|_{t=\tau} = 0, \\ \Delta T|_{z=0} = T_1(z), p|_{z=0} = 0, \\ \frac{\partial \Delta T}{\partial z}|_{z=L} = T_2(z), \frac{\partial p}{\partial z}|_{z=L} = 0, \end{cases} \quad (5)$$

где a , α , β и γ – коэффициенты, полученные при линеаризации уравнения теплообмена, σ – некоторый параметр, характеризующий цену управления, p – вспомогательная функция, $p = p(t, z)$, связанная с управлением $\Delta u(t, z)$ соотношением вида:

$$\Delta u(t, z) = -\frac{\gamma^2 p(t, z)}{\sigma}. \quad (6)$$

Важная особенность рассматриваемой постановки задачи – возможность получить приближенное решение оптимизационной системы (4). Функции $\Delta T(t, z)$ и $\Delta u(t, z)$ могут быть выражены в аналитическом виде, что является важным для использования в режиме реального времени для систем автоматического управления.

Функция $\Delta T(t, z)$, представляющая собой разность функций $T(t, z)$ и $T^*(t, z)$ – фактической и заданной температур, в дальнейшем аппроксимируется полиномиальной функцией. На рис. 1 сплошной линией изображена кривая, построенная по результатам значений массива $\Delta T(t, z)$, а пунктирной – результат аппроксимации $\Delta T(t, z)$ полиномиальной функцией.

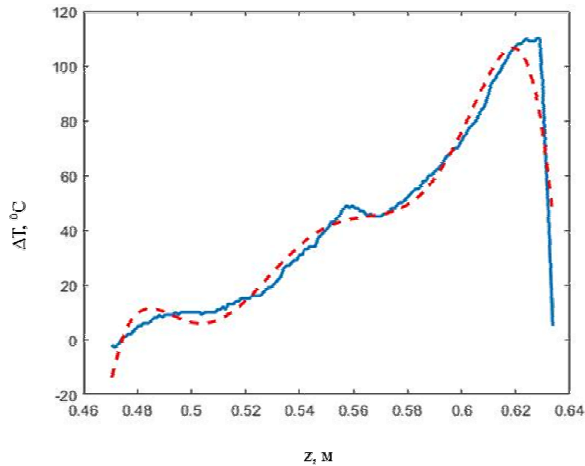


Рис. 1. $\Delta T(t, z)$ и результат аппроксимации

Представленные выше математические модели положены в основу блока вычислений, реализующего алгоритм поиска функции оптимального управления. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 2.

Следует отметить, что представленный выше алгоритм описывает логику работы системы управления в рамках одного цикла управления, ограниченного временем τ . Работу данного алгоритма можно разделить на три основных этапа:

- инициализация;
- вычисления;
- управление.

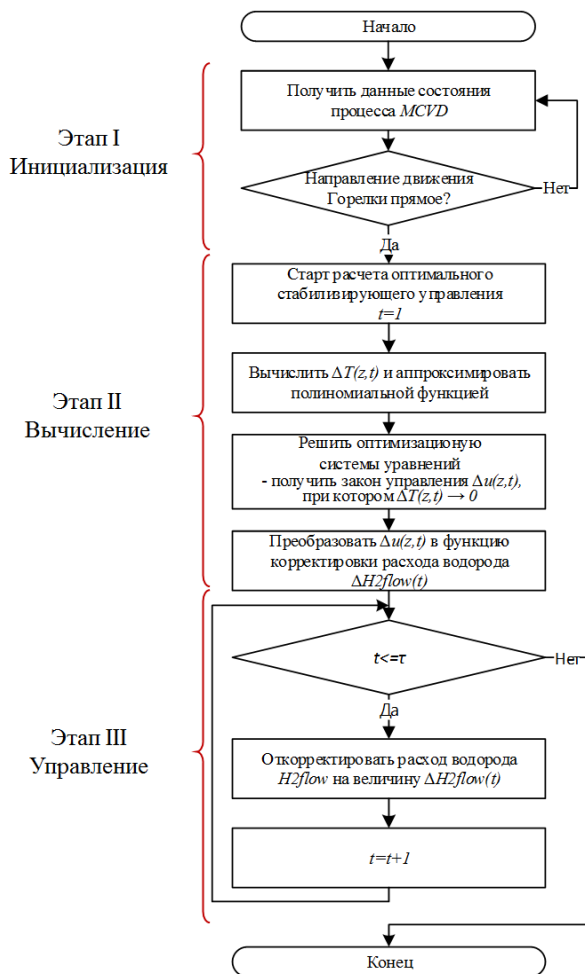


Рис. 2. Блок-схема алгоритма оптимального управления

На этапе инициализации в модуль поступает информация о состоянии объекта управления, включающая в себя значения параметров скорости движения горелки, расхода водорода и кислорода на горелку, температуры на поверхности кварцевой трубы и других параметров.

На этапе вычислений осуществляется аппроксимация функции $\Delta T(t,z)$ полиномом, который выполняет роль начального условия в оптимизационной системе (5). Из решения оптимизационной системы определяется закон управления $\Delta u(t,z)$. В соответствии с этим законом осуществляется корректировка расхода водорода $\Delta H_{2flow}(t)$.

На этапе управления происходит непосредственное воздействие на исполнительный механизм системы управления – текущее значение

величины расхода водорода корректируется на величину $\Delta H_2flow(t)$. Данная корректировка расхода водорода реализуется на временном промежутке, равном 1 с.

2. Программное и информационное обеспечение системы управления. Алгоритм оптимального управления, представленный выше, реализуется на базе управляющего компьютера станка MCVD.

На рис. 3 представлена структурная схема основных модулей управляющего компьютера, задействованных в работе проектируемой системы управления.

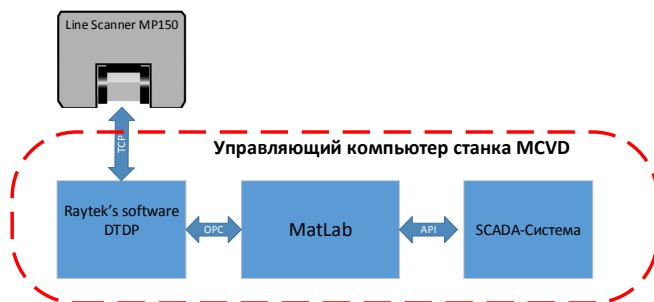


Рис. 3. Программные модули управляющего компьютера, на базе которых реализовано оптимальное управление

Raytek's software DTDP – специализированное программное обеспечение фирмы Raytek, позволяющее получать данные о фактическом состоянии температурного поля со сканирующего пирометра [20].

MatLab – центральный модуль в реализации проектируемой системы управления. Алгоритм полностью реализуется на базе пакета MatLab. Ключевые задачи алгоритма: аппроксимация массива значений $\Delta T(t,z)$ полиномиальной функцией и решение системы уравнений (5). Эти задачи реализуются с помощью набора стандартных функций MatLab. Наличие собственного языка программирования позволяет реализовать логику работы алгоритма. Вариант реализации схожей системы управления с подвижным источником представлен в работе [21].

В текущей задаче MatLab обеспечивает двустороннюю связь со SCADA-системой станка MCVD, запрашивая величины фактических параметров процесса MCVD, участвующих в его реализации, и передавая величину $\Delta u(t,z)$ для корректировки величины расхода водорода. Связь между пакетом MatLab и SCADA-системой реализована через программный интерфейс приложения SCADA-системы (API – application programming interface).

SCADA-система – программный пакет, предназначенный для разработки и обеспечения работы в реальном времени систем сбора, обработки, отображения и архивирования информации об объекте, а также возможного контроля и управления данным объектом. Двух-сторонняя связь между SCADA-системой и MatLab позволяет осуществлять обмен ключевыми параметрами процесса, необходимыми для реализации алгоритма оптимального управления. Разработан протокол взаимодействия MatLab и SCADA-системы (таблица).

Протокол взаимодействия MatLab и SCADA-системы

Название переменной	Комментарий	Взаимодействие
BurnerH2FlowOut	Расход водорода	От SCADA к MatLab
BurnerH2FlowM	Расход водорода	От MatLab к SCADA
BurnerO2FlowOut	Расход кислорода	От SCADA к MatLab
BurnerO2FlowM	Расход кислорода	От MatLab к SCADA
CarriageSpeedOut	Скорость движения горелки	От SCADA к MatLab
CarriageSpeedM	Скорость движения горелки	От MatLab к SCADA
CarriageRelativePositionFromInlet	Позиция горелки от ПБ	От SCADA к MatLab
BurnerTemperature	Температура ($T_{\text{макс}}$)	От SCADA к MatLab
BurnerTemperatureSetpoint	Заданная температура ($T_{\text{макс}}$)	От SCADA к MatLab
BurnerCurtainLeftOut	Обдув горелки азотом слева	От SCADA к MatLab
BurnerCurtainLeftM	Обдув горелки азотом слева	От MatLab к SCADA
BurnerCurtainRightOut	Обдув горелки азотом справа	От SCADA к MatLab
BurnerCurtainRightM	Обдув горелки азотом справа	От MatLab к SCADA
BurnerTempCntrInternal	0 – режим ручного управления H ₂ /O ₂ 1 – режим автоматического управления H ₂ /O ₂	От SCADA к MatLab
BurnerModeM	0 – SCADA управление 1 – управление расходами O ₂ /H ₂ через MatLab	От MatLab к SCADA

Таким образом, была решена задача межпрограммного взаимодействия MatLab и SCADA-системы, позволяющая адаптировать модуль оптимального управления в систему управления станка MCVD.

Выводы. В работе рассмотрены вопросы математического обеспечения системы оптимального управления подвижным источником теплового воздействия в процессе легирования методом MCVD (modified chemical vapor deposition). Предложен алгоритм управления подвижным источником теплового воздействия, позволяющий стабилизировать температурное поле в режиме реального времени.

Библиографический список

1. Математическая теория оптимальных процессов / Л.С. Понтрягин, В.Г. Болтянский, Р.В. Гамкрелидзе, Е.Ф. Мищенко. – М.: Наука, 1983. – 393 с.
2. Ли Э.Б., Маркус Л. Основы теории оптимального управления. – М.: Наука, 1972. – 576 с.
3. Алексеев В.М., Тихомиров В.М., Фомин С.В. Оптимальное управление. – М.: Наука, 1979. – 430 с.
4. Егоров А.И. Основы теории управления. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 504 с.
5. Фурсиков А.В. Оптимальное управление распределенными системами. Теория и приложения: учеб. пособие. – Новосибирск: Научная книга, 1999. – 352 с.
6. Александров А.Г. Оптимальные и адаптивные системы: учеб. пособие. – М.: Высшая школа, 1989. – 263 с.
7. Первадчук В.П., Шумкова Д.Б. Оптимальное управление в задачах с подвижным тепловым источником // Научно-технические ведомости Санкт-Петербург. гос. политехн. ун-та. Физико-математические науки. – 2010. – Т. 2. – № 98. – С. 37–44.
8. Первадчук В.П., Шумкова Д.Б. Оптимальное управление подвижным тепловым источником в процессе MCVD с учетом всех видов теплообмена // Фотон-экспресс. – 2013. – № 6(110). – С. 304–305.
9. Dependence of equilibria in the modified chemical vapor-deposition process on SiCl_4 , GeCl_4 , and O_2 / K.B. McAfee, K.L. Walker, R.A. Laudise, R.S. Hozack // Journal of the American Ceramic Society. – 1984. – № 67(6). – P. 420–424.
10. Suzanne R. Nagel, J.B. Macchesney, Kenneth L. Walker. An Overview of the Modified Chemical Vapor Deposition (MCVD) Process and Performance // IEEE. Journal of quantum electronics. – April, 1982. – Vol. MTT-30, № 4.
11. Cognolato L. Chemical Vapour Deposition for Optical Fibre Technology // Journal de Physique IV Colloque. – 1995. – Vol. 5. – P. C5–975–C5–987.
12. Germanium Chemistry in the MCVD Process for Optical Fiber Fabrication / D.L. Wood, K.L. Walker, J.B. Macchesney, J.R. Simpson, R. Csencsits // Journal of lightwave technology, – February, 1987. – Vol. LT-5, № 2.

13. Бутковский А.Г., Пустыльников Л.М. Теория подвижного управления системами с распределенными параметрами. – М.: Наука, 1980. – 384 с.

14. Кубышкин В.А., Финягина В.И. Подвижное управление в системах с распределенными параметрами. – М.: Синтег, 2005. – 232 с.

15. Choi M., Park K.S., Cho J. Modelling of chemical vapour deposition for optical fibre manufacture // *Optical and Quantum Electronics*. – May, 1995. – Vol. 27, № 5. – P. 327–335.

16. Шумкова Д.Б. Оптимальное управление в задачах с неизвестными границами и подвижными источниками: дис. канд. физ.-мат. наук. – Пермь, 2006. – 111 с.

17. Первадчук В.П., Владимирова Д.Б., Дектярев Д.Н. Оптимальное стабилизирующее управление подвижным тепловым источником в процессе MCVD // *Прикладная фотоника*. – 2016. – Т. 3, № 1. – С. 76–87.

18. Моделирование нагрева кварцевых труб подвижным источником воздействия для решения задачи управления процессом MCVD / В.П. Первадчук, Д.Б. Владимирова, Д.Н. Дектярев, А.А. Пестерев // *Международ. науч.-исслед. журнал*. – 2016. – № 9-2(51). – С. 76–82.

19. Pervadchuk V., Vladimirova D., Gordeeva I. Optimal control of distributed systems in problems of quartz optical fiber production [Electronic resource] // 6th International Eurasian Conference on Mathematical Sciences and Applications (IECMSA 2017); 15–18 August 2017, Budapest, Hungary / ed. M. Tosun, S. Ersoy, K. Ilarslan; Amer. Inst. of Physics (AIP). – New York: AIP Publishing, 2018. – Art. 020036. – P. 1020036-1020036-9. (AIP Conference Proceedings; vol. 1926). DOI: 10.1063/1.5020485

20. Пестерев А.А. Сканирующий пирометр в системе управления MCVD процесса // *Автоматизация в промышленности*. – 2016. – № 8. – С. 49–51.

21. Кубышкин В.А., Суховеров В.С. Система моделирования и управления подвижным воздействием на базе программных средств MatLab // *Проблемы управления*. – 2008. – № 2. – С. 64–69.

References

1. Pontriagin L.S., Boltianskii V.G., Gamkrelidze R.V., Mishchenko E.F. *Matematicheskaya teoriya optimal'nykh protsessov* [Mathematical theory of optimal processes]. Moscow: Nauka, 1983. 393 p.

2. Li E.B., Markus L. Osnovy teorii optimal'nogo upravleniia [Fundamentals of the theory of optimal control]. Moscow: Nauka, 1972. 576 p.
3. Alekseev V.M., Tikhomirov V.M., Fomin S.V. Optimal'noe upravlenie [Optimal control]. Moscow: Nauka, 1979. 430 p.
4. Egorov A.I. Osnovy teorii upravleniia [Optimum control of thermal and diffusion processes]. Moscow: FIZMATLIT, 2004. 504 p.
5. Fursikov A.V. Optimal'noe upravlenie raspredelennymi sistemami. Teoriia i prilozheniia [Optimum control of distributed systems]. Novosibirsk: Nauchnaia kniga, 1999. 352 p.
6. Aleksandrov A.G. Optimal'nye i adaptivnye sistemy [Optimum and adaptive systems]. Moscow: Vysshaia shkola, 1989. 263 p.
7. Pervadchuk V.P., Shumkova D.B. Optimal'noe upravlenie v zadachakh s podvizhnym teplovym istochnikom [Optimum control in problems with a mobile heat source]. *Nauchno-tekhnichestkie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Fiziko-matematicheskie nauki*, 2010, vol. 2, no. 98, pp. 37-44.
8. Pervadchuk V.P., Shumkova D.B. Optimal'noe upravlenie podvizhnym teplovym istochnikom v protsesse MCVD s uchetom vsekh vidov teploobmena [Optimal control of the mobile thermal source in the MCVD process, taking into account all types of heat transfer]. *Foton-ekspress*, 2013, no 6(110), pp. 304-305.
9. McAfee K.B., Walker K.L., Laudise R.A., Hozack R.S. Dependence of equilibria in the modified chemical vapor-deposition process on SiCl_4 , GeCl_4 , and O_2 . *Journal of the American Ceramic Society*, 1984, no. 67(6), pp. 420-424.
10. Suzanne R. Nagel, J.B. Macchesney, Kenneth L. Walker. An Overview of the Modified Chemical Vapor Deposition (MCVD) Process and Performance. *IEEE. Journal of quantum electronics*, April, 1982, vol. MTT-30, no. 4.
11. Cognolato L. Chemical Vapour Deposition for Optical Fibre Technology. *Journal de Physique IV Colloque*, 1995, vol. 5, pp. C5-975-C5-987.
12. Wood D.L., Walker K.L., Macchesney J.B., Simpson J.R., Csencsits R. Germanium Chemistry in the MCVD Process for Optical Fiber Fabrication. *Journal of lightwave technology*, February, 1987, vol. LT-5, no. 2.

13. Butkovskii A.G., Pustyl'nikov L.M. Teoriia podvizhnogo upravleniia sistemami s raspredelennymi parametrami [The theory of the mobile control of systems with distributed parameters]. Moscow: Nauka, 1980. 384 p.

14. Kubyshekin V.A., Finiagina V.I. Podvizhnoe upravlenie v sistemakh s raspredelennymi parametrami [Mobile control in systems with distributed parameters]. Moscow: Sinteg, 2005. 232 p.

15. Choi M., Park K.S., Cho J. Modelling of chemical vapour deposition for optical fibre manufacture. *Optical and Quantum Electronics*, May, 1995, vol. 27, no. 5, pp. 327-335.

16. Shumkova D.B. Optimal'noe upravlenie v zadachakh s neizvestnymi granitsami i podvizhnymi istochnikami [Optimal control in problems with unknown boundaries and moving sources]. Ph.D. thesis. Perm', 2006. 111 p.

17. Pervadchuk V.P., Vladimirova D.B., Dektiarev D.N. Optimal'noe stabiliziruiushchie upravlenie podvizhnym teplovym istochnikom v protsesse MCVD [Optimal stabilizing control of the mobile thermal source in the MCVD process]. *Prikladnaia fotonika*, 2016, vol. 3, no. 1, pp. 76-87.

18. Pervadchuk V.P., Vladimirova D.B., Dektiarev D.N., Pesterev A.A. Modelirovanie nagreva kvartseykh trub podvizhnym istochnikom vozdeistviia dlia resheniia zadachi upravleniia protsessom MCVD [Modeling of quartz tube heating by a mobile source of influence for solving the process control problem MCVD]. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal*, 2016, no. 9-2(51), pp. 76-82.

19. Pervadchuk V., Vladimirova D., Gordeeva I. Optimal control of distributed systems in problems of quartz optical fiber production. *6th International Eurasian Conference on Mathematical Sciences and Applications (IECMSA 2017); 15–18 August 2017, Budapest, Hungary*. Ed. M. Tosun, S. Ersoy, K. Ilarslan; Amer. Inst. of Physics (AIP). New York: AIP Publishing, 2018. Art. 020036. pp. 1020036-1020036-9. (AIP Conference Proceedings; vol. 1926). DOI: 10.1063/1.5020485

20. Pesterev A.A. Skaniruiushchii pirometr v sisteme upravleniia MCVD protsessa [Scanning pyrometer in MCVD process control system]. *Avtomatizatsiia v promyshlennosti*, 2016, no. 8, pp. 49-51.

21. Kubyshekin V.A., Sukhoverov B.C. Sistema modelirovaniia i upravleniia podvizhnym vozdeistviem na baze programmnykh sredstv MatLab [The system of modeling and control of mobile impact on the basis of software MatLab]. *Problemy upravleniia*, 2008, no. 2, pp. 64-69.

Сведения об авторах

Первадчук Владимир Павлович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Прикладная математика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр-кт, 29, e-mail: pervadchuk@mail.ru).

Владиминова Дарья Борисовна (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная математика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: pervadchuk@mail.ru).

Пестерев Анатолий Александрович (Пермь, Россия) – заместитель директора по ИТ - начальник отдела автоматизации технологических процессов ПАО «Пермская научно-промышленная производственная компания» (614007, Пермь, ул. 25 Октября, 106, e-mail: pesterev@ppk.perm.ru).

About the authors

Pervadchuk Vladimir Pavlovich (Perm, Russian Federation) is a Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Applied Mathematics, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: pervadchuk@mail.ru).

Vladimirova Darya Borisovna (Perm, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Applied Mathematics, National Research Tomsk Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: pervadchuk@mail.ru).

Pesterev Anatoly Aleksandrovich (Perm, Russian Federation) is a Deputy CIO – Head of automation department, Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company (614007, Perm, 106, October 25th str., e-mail: pesterev@ppk.perm.ru).

Получено 09.07.2018