

УДК 66.012-52

А.О. Колыхматов, В.П. Плаксина, А.Г. Шумихин

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАКОПЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ОТСТОЙНИКЕ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ СИСТЕМЫ ОБОРОТНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ ПРИ СИНТЕЗЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Рассматривается синтез автоматической системы управления накоплением жидкости в отстойнике системы оборотного водоснабжения очистных сооружений, построенной с учетом результатов моделирования отстойника как динамического объекта управления.

Современные установки очистки сточных вод крупных производств нефтепереработки являются, как правило, системами оборотного водоснабжения, в том числе замкнутыми (бессточными) системами.

Мероприятиями промышленных предприятий нефтегазового комплекса предусматривается совершенствование и модернизация системы оборотного водоснабжения. Моделирование и компьютерные эксперименты с математической моделью такой системы являются эффективным средством для создания системы управления, позволяющим оценить альтернативные структуры и законы управления, рассмотреть поведение управляемого объекта во внестатных ситуациях, например при «залповых» сбросах загрязнений. Это требует, в свою очередь, разработки методик моделирования динамических режимов системы оборотного водоснабжения с учетом запаздывания в «каналах» возмущающих и управляющих воздействий.

Широкое применение при очистке сточных вод находит процесс отстаивания. Практически на всех станциях очистки питьевых и сточных вод городов и промышленных предприятий существуют отстойники. Очистка сточных вод от масел и нефтепродуктов осуществляется главным образом в отстойных сооружениях.

Отстаивание воды – процесс выделения из нее под действием гравитационных сил взвешенных веществ. При этом частицы с плотностью, большей плотности воды, движутся вниз, с мень-

шей – вверх. Сооружения, в которых осуществляется этот процесс, и называют отстойниками.

В работе составлено математическое описание динамики накопления жидкости в отстойнике в виде обыкновенного дифференциального уравнения с отклоняющимся аргументом, получено его аналитическое решение, приведены результаты численного компьютерного решения дифференциального уравнения в сравнении с результатами вычислений по его аналитическому решению. Предложена система автоматического управления накоплением жидкости в отстойнике с алгоритмом контроллера, синтезированным с учетом аналитического решения.

Ключевые слова: *очистные сооружения, оборотное водоснабжение, отстойник, математическое описание, дифференциальное уравнение, отклоняющийся аргумент, система автоматического управления.*

A.O. Kolykhmatov, V.P. Plaksina, A.G. Shumikhin

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

THE TREATMENT PLANT CIRCULATING WATER SUPPLY SUMP LIQUID ACCUMULATION PROCESS MODELING IN CASE OF SYNTHESIS OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEM

The article deals with the synthesis of automatic control system for the accumulation of fluid in the treatment plant circulating water supply sump, based on the results of modeling of the sump as a dynamic control object.

Modern wastewater treatment apparatus at large-scale oil refinery are usually water recycling systems including closed (undrained) systems.

Industry aims to improve oil and gas manufacturing and upgrade water recycling system. Modeling and computer experiments with a mathematical model of this system is an effective way to create a control system which allows to evaluate alternative structures and control algorithms, consider the behavior of the control object in emergency situations, such as "salvo" pollution discharges. It requires the development of modeling techniques of circulating water supply dynamic modes, taking into account the delay in the disturbing and control inputs.

Settling is widely used in the wastewater treatment process. Almost all drinking water and sewage towns clean stations and industrials have sumps. Wastewater from oil and petroleum products is carried out mainly in the settling facilities.

The article presents mathematical description of the dynamics of accumulation of fluid in the sump in the form of an ordinary differential equation with deviating argument. It's analytic solution and computer numerical solution are received. The results are compared. The system of automatic control of the accumulation of fluid in the sump is proposed. The system has controller algorithm synthesized by analytical solutions.

Keywords: *treatment plant, circulating water supply, sump, the mathematical description, the differential equation, deviating argument, automated control system.*

Природные воды, забираемые из поверхностных источников водоснабжения, как правило, загрязнены взвесями, имеющими плотность больше плотности воды. Исходя из этого их можно отнести к суспензиям. Сточные воды могут быть как суспензиями, так и эмульсиями. В последнем случае взвешенными веществами являются масла, жиры и нефтепродукты. В производственных сточных водах компоненты загрязнений, имеющие плотность больше и меньше плотности воды, часто присутствуют одновременно. Равномерное распределение потока воды обеспечивает максимальное использование объема отстойного сооружения.

Для повышения эффективности процесса отстаивания воды и сокращения объема отстойных сооружений применяют предварительную коагуляцию или флокуляцию загрязнений реагентами. В этом случае узел сооружений отстаивания дополняют узлом реагентной обработки воды.

Важную роль для систем оборотного водоснабжения играет управление количеством жидкости в емкости очистных сооружений [1, 2]. Создание эффективной системы управления осуществляется на основе результатов моделирования динамики емкости системы водоснабжения с рециклом, описываемой дифференциальным уравнением общего материального баланса с отклоняющимся аргументом [3].

На рис. 1 представлена структура динамической модели для расчета характеристик изменения объема накопленной жидкости $y_H(t)$ в очистных сооружениях.

Вода из водопровода ($x(t)$) поступает на технологические объекты (каналы потребления $K_i, i = \overline{1, N}$), после чего поступает на очистные сооружения и накапливается в емкости, представленной интегрирую-

щим звеном, описываемым уравнением $y_H(t) = \int_0^t x(t) \cdot dt$. Из емкости часть воды возвращается на технологические объекты и еще некоторая часть идет на сброс ($x_{сбр}(t)$). В модели также учтены потери ($x_{пот}(t)$), возникающие, например, из-за испарения.

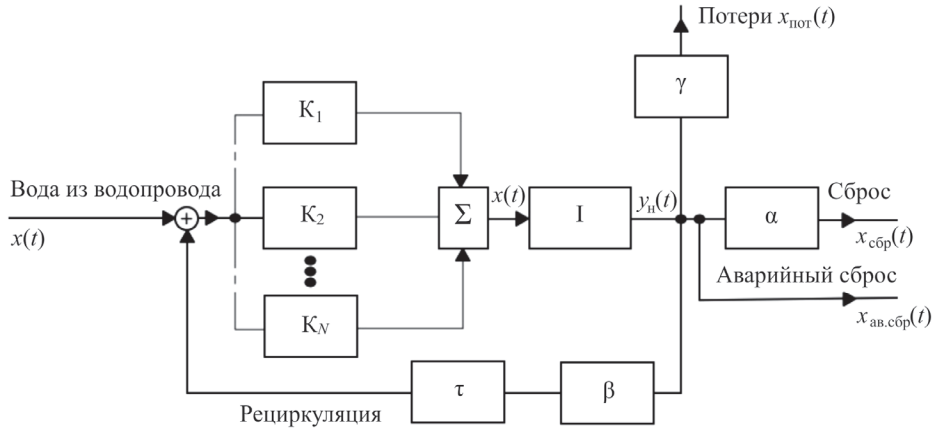


Рис. 1. Структура модели для расчета характеристик изменения объема накопленной жидкости в емкостях очистных сооружений с учетом задержек в системе рециркуляции жидкости

К входу интегратора $\int x(t) \cdot dt$ подключен выход сумматора Σ . На каждый из входов сумматора без инверсии знака поступают потоки жидкости из различных технологических каналов потребления воды. В рассматриваемой модели полагается, что $\sum_{i=1}^N K_i = 1$. Накопление за время T количества жидкости $y_H(t)$ в емкостях описывается следующим образом. Учитывая, что объем $y_H(t)$ определяется интегралом от суммы расходов притока $x(t)$ из водопровода, задержанного по времени потока рециркуляции $y_H(t - \tau)\beta$, потока сброса $x_{сбр}(t)$, взятого с обратным знаком, потока рециркуляции $y_H(t)$, потока аварийного сброса $x_{ав.сбр}(t)$ и потерь $x_{пот}(t)$, функционал для его вычисления будет иметь вид

$$y_H(t) = y_0 + \int_0^T [x(t) + y_H(t - \tau)\beta - y_H(t)\beta - x_{сбр}(t) - x_{пот}(t) - x_{ав.сбр}(t)] \cdot dt. \quad (1)$$

Интегральное уравнение (1) может быть преобразовано в эквивалентное дифференциальное уравнение с отклоняющимся аргументом следующего вида:

$$\frac{dy_H(t)}{dt} + \beta \cdot y_H(t) - \beta \cdot y_H(t - \tau) = x(t) - x_{\text{сбр}}(t) - x_{\text{пот}}(t) - x_{\text{ав.сбр}}(t). \quad (2)$$

Для решения дифференциального уравнения принимаются следующие допущения: $x_{\text{ав.сбр}}(t) = 0$.

Тогда уравнение (2) примет вид

$$\frac{dy_H(t)}{dt} + \beta \cdot y_H(t) - \beta \cdot y_H(t - \tau) = x(t) - x_{\text{сбр}}(t) - x_{\text{пот}}(t). \quad (3)$$

Решение уравнения (3) будем искать в виде

$$y_H(t) = \int_0^t C(t,s)(x(s) - x_{\text{сбр}}(s) - x_{\text{пот}}(s))ds,$$

где $C(t, s)$ – функция Коши [4, с. 35].

Функция Коши найдется как решение [4, с. 96] следующей задачи:

$$\begin{cases} \frac{dy_H(t)}{dt} + \beta \cdot y_H(t) - \beta \cdot y_H(t - \tau) = 0; \\ y_H(s) = 1. \end{cases} \quad (4)$$

Решение задачи (4) методом «шагов» [5] дает выражение

$$C(t,s) = \sum_0^{\infty} \frac{\beta^n}{n!} (t-s-n\tau)^n \cdot e^{-\beta(t-s-n\tau)} \theta(t-s-n\tau),$$

где $\theta(\zeta) = \begin{cases} 1, & \text{если } \zeta \geq 0; \\ 0, & \text{если } \zeta < 0. \end{cases}$

Тогда решение дифференциального уравнения (3) [6] приобретает вид

$$\begin{aligned}
 y_H(t) = & \int_0^t e^{-\beta(t-s)} (x(s) - x_{\text{сбр}}(s) - x_{\text{пот}}(s)) ds + \\
 & + \beta \int_0^{t-\tau} (t-s-\tau) e^{-\beta(t-s-\tau)} (x(s) - x_{\text{сбр}}(s) - x_{\text{пот}}(s)) ds + \\
 & + \frac{\beta^2}{2!} \int_0^{t-2\tau} (t-s-2\tau)^2 \cdot e^{-\beta(t-s-2\tau)} (x(s) - x_{\text{сбр}}(s) - x_{\text{пот}}(s)) ds + \quad (5) \\
 & + \frac{\beta^3}{3!} \int_0^{t-3\tau} (t-s-3\tau)^3 \cdot e^{-\beta(t-s-3\tau)} (x(s) - x_{\text{сбр}}(s) - x_{\text{пот}}(s)) ds + \dots + \\
 & + \frac{\beta^n}{n!} \int_0^{t-n\tau} (t-s-n\tau)^n \cdot e^{-\beta(t-s-n\tau)} (x(s) - x_{\text{сбр}}(s) - x_{\text{пот}}(s)) ds + \dots
 \end{aligned}$$

Численное решение уравнения (3) при заданных исходных данных $\beta = 0,65$, $\tau = 4$ мин, $x = 0,1$, $x_{\text{пот}}(t) \approx 0$ получено с помощью специальной функции прикладного пакета Matlab [7, 8] (рис. 2). Аналогичное решение, график которого совпадает с графиком на рис. 2, получается при вычислении $y_H(t)$ с использованием ряда (5).

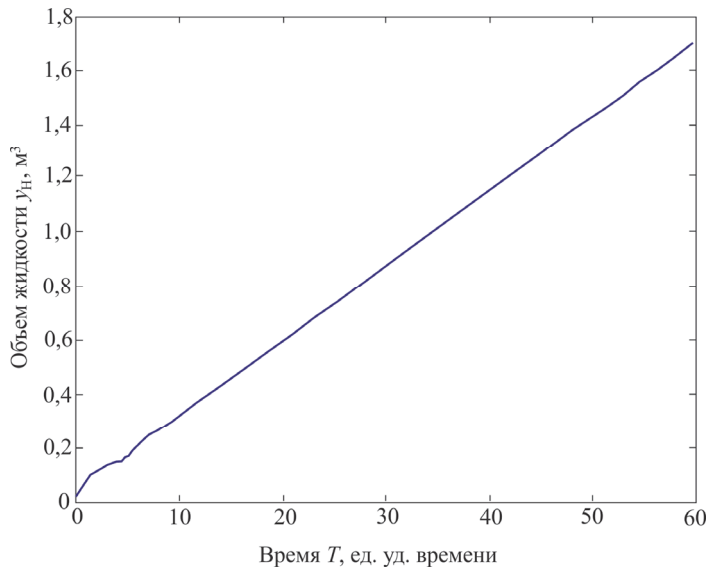


Рис. 2. Решение уравнения с отсутствием существенных потерь

При увеличении количества возвращаемой жидкости ($\beta = 0,8$) при тех же τ и x , с учетом существенных потерь ($x_{\text{пот}}(t) \approx 0,01$) решение уравнения (3) приобретает вид, представленный на рис. 3.

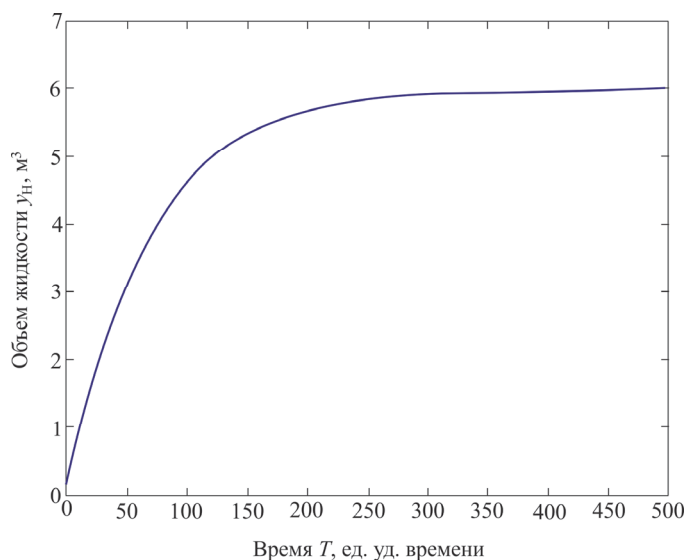


Рис. 3. Решение уравнения (3) с существенными потерями жидкости

Графики на рис. 2 и 3 показывают, что при увеличении возвращаемой жидкости и учете существенных потерь отстойник является статическим объектом, а при отсутствии существенных потерь по объему аккумулярованной жидкости $y_H(t)$ астатическим.

Для обеспечения надежного и устойчивого управления накоплением жидкости в емкостях очистных сооружений предложена система автоматического управления (САУ) (рис. 4), основу которой составляет микропроцессорный контроллер.

Контроллер обеспечивает управление объектом, позволяет осуществлять логические операции по программе без вмешательства в устройство объекта, а также изменять программу в процессе работы.

Эффективность системы управления во многом зависит от разработанного алгоритма. В соответствии с этим для управления накоплением жидкости разработан специальный алгоритм, реализуемый в промышленном контроллере. Полученный ряд (5) используется в алгоритме управления, что позволяет определить режим функционирования объекта и выбрать необходимую структуру регулятора [9, 10] управления накоплением жидкости в емкости.

В случае, если объект является статическим, необходимо использовать ПИ-регулятор с соответствующими настройками. Если же режим функционирования объекта астатический, то необходимо интегральную составляющую регулятора исключить [11].

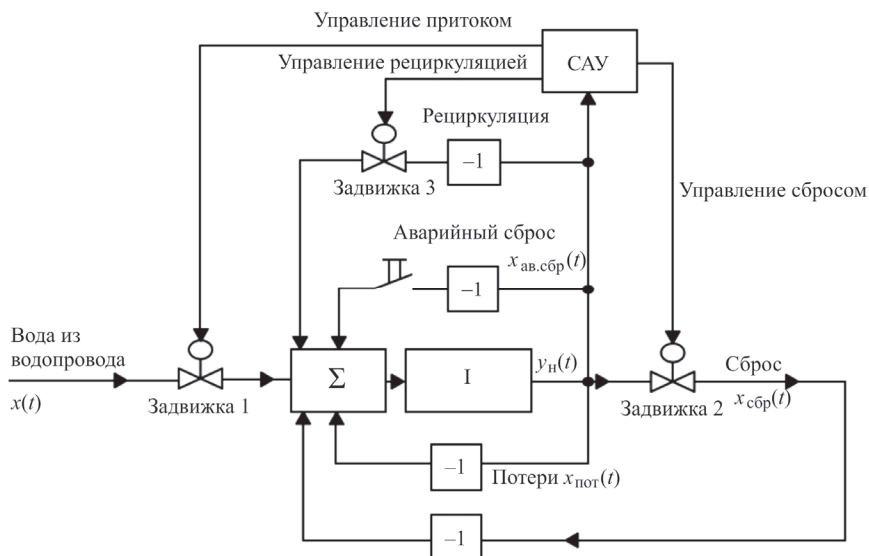


Рис. 4. Система автоматического управления уровнем жидкости и потоками в очистных сооружениях

Основной контролируемой величиной, определяющей формирование сигналов управления, является объем накопленной жидкости $y_H(t)$. Соответствующий сигнал поступает в блок САУ с датчика уровня жидкости в емкости очистных сооружений.

С помощью задвижки 1 блок САУ осуществляет управление величиной $x(t)$ притока жидкости, подаваемой на очистку из технологического оборудования. С помощью задвижки 2 блок САУ осуществляет управление величиной потока $x_{сбр}(t)$ жидкости, который определяется количеством сбрасываемой в реку очищенной жидкости. Управление величиной потока рециркулирующей жидкости осуществляется задвижкой 3, состояние которого фактически определяет глубину отрицательной обратной связи (ООС). Возвратно-циркулирующая жидкость предназначена для повторного использования в технологическом процессе.

Таким образом, результаты математического моделирования процесса отстаивания жидкости с рециркуляцией прошедшей очистку воды, описываемого дифференциальным уравнением с отклоняющимся аргументом, позволяют синтезировать автоматическую систему с переменной структурой логического управления отстойником как объектом регулирования количества аккумулированной в нем жидкости.

Список литературы

1. Беличенко Ю.П., Гордеев Л.С., Комиссаров Ю.А. Замкнутые системы водообеспечения химических производств. – М.: Химия, 1996. – 270 с.
2. Гордин И.В., Манусова Н.Б., Смирнов Д.Н. Оптимизация химико-технологических систем очистки промышленных сточных вод. – М.: Химия, 1977. – 176 с.
3. Бондарук А.М. Обеспечение промышленной безопасности на этапах строительства и освоения объектов нефтегазового комплекса: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Уфа, 2011. – 25 с.
4. Азбелев Н.В., Симонов П.М. Устойчивость решений уравнений с обыкновенными производными. – Пермь: Изд-во Перм. гос. ун-та, 2001. – 230 с.
5. Беллман Р., Кук К.Л. Дифференциально-разностные уравнения. – М.: Мир, 1967. – 548 с.
6. Мышкис А.Д. Линейные дифференциальные уравнения с запаздывающим аргументом. – М.: Наука, 1972. – 352 с.
7. Смирнов А. Matlab 7.0. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.
8. Шампайн Л.Ф., Гладвел И., Томпсон С. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений с использованием MATLAB. – М.: Лань, 2009. – 304 с.
9. Автоматические системы и регуляторы с расширенными функциональными возможностями для непрерывных технологических процессов: в 2 т. Т. 1. Синтез алгоритмов и функциональных структурных схем / А.С. Ключев [и др.]. – М.: Испо-Сервис, 2004. – 264 с.
10. Автоматические системы и регуляторы с расширенными функциональными возможностями для непрерывных технологических процессов: в 2 т. Т. 2. Техническая реализация регуляторов и автоматических систем / А.С. Ключев [и др.]. – М.: Испо-Сервис, 2004. – 128 с.
11. Ротач В.Я. Теория автоматического управления. – М.: Изд-во Моск. энергетич. ин-та, 2004. – 400 с.

References

1. Belichenko Yu.P., Gordeev L.S., Komissarov Yu.A. Zamknutyte sistemy vodoobespecheniya khimicheskikh proizvodstv [Closed systems of water supply of chemical productions]. Moscow: Khimiya, 1996. 270 p.
2. Gordin I.V., Manusova N.B., Smirnov D.N. Optimizatsiya khimiko-tekhnologicheskikh sistem ochistki promyshlennykh stochnykh vod [Optimization of chemical and technological systems of cleaning of industrial sewage]. Moscow: Khimiya, 1977. 176 p.
3. Bondaruk A.M. Obespechenie promyshlennoy bezopasnosti na etapakh stroitelstva i osvoeniya obektov neftegazovogo kompleksa [Support of industrial safety at stages of construction and mastering of objects of an oil and gas complex]: abstract thesis of the candidate of technical sciences. Ufa, 2011. 25 p.

4. Azbelev N.V., Simonov P.M. Ustoychivost resheniy uravneniy s obyknovennymi proizvodnymi [Stability of solutions of the equations with ordinary derivatives]. Perm: Permskiy gosudarstvennyy universitet, 2001. 230 p.

5. Bellman R., Kuk K.L. Differentsialno-raznostnye uravneniya [Differential-difference equations]. Moscow: Mir, 1967. 548 p.

6. Myshkis A.D. Lineynye differentsialnye uravneniya s zapazdyvayuschim argumentom [The linear differential equations with retarded argument]. Moscow: Nauka, 1972. 352 p.

7. Smirnov A. Matlab 7.0 [Matlab 7.0]. St.-Petersburg: BKHV-Petersburg, 2005. 1104 p.

8. Shampayn L.F., Gladvel I., Tompson S. Reshenie obyknovennykh differentsialnykh uravneniy s ispolzovaniem MATLAB [The solution of ordinary differential equations with MATLAB use]. Moscow: Lan, 2009. 304 p.

9. Klyuev A.S. [et al.]. Avtomaticheskie sistemy i regulatory s rasshirennymi funktsionalnymi vozmozhnostyami dlya nepreryvnykh tekhnologicheskikh protsessov: v 2 tomakh. Tom 1: Sintez algoritmov i funktsionalnykh strukturnykh skhem [Automatic systems and regulators with enhanced functional capabilities for the continuous technological processes: in 2 volumes. Vol. 1: Synthesis of algorithms and the functional skeleton diagrams]. Moscow: Ispo-Servis, 2004. 264 p.

10. Klyuyev A.S. [et al.]. Avtomaticheskie sistemy i regulatory s rasshirennymi funktsionalnymi vozmozhnostyami dlya nepreryvnykh tekhnologicheskikh protsessov: v 2 tomakh. Tom 2: Tekhnicheskaya realizatsiya regulatorov i avtomaticheskikh sistem [Automatic systems and regulators with enhanced functional capabilities for the continuous technological processes: in 2 volumes. Vol. 2: Technical implementation of regulators and automatic systems]. Moscow: Ispo-Servis, 2004. 128 p.

11. Rotach V.Ya. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya [Theory of automatic control]. Moscow: Moskovskiy energeticheskiy universitet, 2004. 400 p.

Об авторах

Колыхматов Аркадий Олегович (Пермь, Россия) – студент кафедры автоматизации технологических процессов Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: atp@pstu.ru).

Плаксина Вера Павловна (Пермь, Россия) – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: vm@pstu.ru).

Шумихин Александр Георгиевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: atp@pstu.ru).

About the authors

Arkadiy O. Kolykhmatov (Perm, Russian Federation) – student, department of automation technological processes, Perm National Research Polytechnic University (Komsomolsky av., 29, Perm, 614990, Russian Federation; e-mail: atp@pstu.ru).

Vera P. Plaksina (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in physics-mathematical sciences, associate professor, department of mathematics, Perm National Research Polytechnic University (Komsomolsky av., 29, Perm, 614990, Russian Federation; e-mail: vm@pstu.ru).

Aleksandr G. Shumikhin (Perm, Russian Federation) – doctor of technical sciences, professor, head of department of automation technological processes, Perm National Research Polytechnic University (Komsomolsky av., 29, Perm, 614990, Russian Federation; e-mail: atp@pstu.ru).

Получено 10.04.2014