



# Math-Net.Ru

All Russian mathematical portal

E. Kushnikova, A. F. Rezhikov, Mathematical model for determination of mass and gross emissions of atmospheric pollutants of the industrial enterprises, *Vestn. Astrakhan State Technical Univ. Ser. Management, Computer Sciences and Informatics*, 2015, Number 4, 134–140

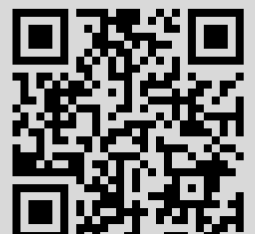
Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that you have read and agreed to these terms of use

<http://www.mathnet.ru/eng/agreement>

Download details:

IP: 44.220.255.141

November 5, 2024, 03:59:20



# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 574:517.977

*Е. В. Кушникова, А. Ф. Резчиков*

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАССОВОГО И ВАЛОВОГО ВЫБРОСА АТМОСФЕРНЫХ ПОЛЛЮТАНТОВ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

В процессе функционирования технологического оборудования промышленного предприятия в атмосферу поступает несколько десятков поллютантов, оказывающих вредное воздействие на здоровье населения, окружающую среду, сельскохозяйственные посевы и т. д. Для определения концентрации данных загрязнителей на контролируемых объектах и территориях используются модели адвективного переноса и диффузии, вызванной турбулентным взаимодействием воздушных масс. В основу этих моделей положено допущение, что весовой выброс поллютантов в атмосферу на всем интервале решения задачи остается неизменным. Однако на практике весовой выброс существенно трансформируется в зависимости от изменений состава и производительности работающего оборудования, производственной программы и т. д. Математическая модель, разработанная для определения валового и массового выброса атмосферных поллютантов промышленного предприятия, позволяет более точно определить величину весового расхода загрязнителей и, благодаря этому, существенно повысить точность прогнозирования степени загрязнения контролируемых объектов и территорий атмосферными выбросами промышленных предприятий.

**Ключевые слова:** имитационная модель, выброс загрязнителей, промышленное предприятие, автоматизированное управление.

### **Введение**

В системах объектового управления Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (МЧС России) и экологического мониторинга предприятий при математическом моделировании процесса загрязнения объектов и территорий атмосферными поллютантами широкое распространение получили формальные модели адвективного переноса и диффузии, вызванной турбулентным взаимодействием воздушных масс [1]. В основу этих моделей положено допущение, что величины массового и валового выброса атмосферных загрязнителей промышленного предприятия на интервале моделирования остаются постоянными, хотя в действительности они изменяются во времени в зависимости от состава и производительности технологического оборудования, его износа и интенсивности эксплуатации, особенностей производственной программы и т. д. Использование данного допущения обуславливают, на наш взгляд, сложность аналитического описания процесса формирования атмосферных выбросов технологическим оборудованием, случайный характер включения или отключения оборудования на интервале моделирования, различная продолжительность и эффективность работы воздушных фильтров и др.

Один из способов повышения точности прогнозирования загрязненности контролируемых объектов и территорий атмосферными выбросами связан с использованием численных имитационных моделей, описывающих процесс формирования и переноса атмосферных поллютантов. Это обстоятельство обуславливает практическую направленность цели нашего исследования – разработка имитационной модели для определения величины массового и валового выброса загрязнителей атмосферы промышленного предприятия.

### Постановка задачи

Целью нашего исследования стала разработка имитационной модели процесса формирования атмосферных поллютантов технологическим оборудованием промышленного предприятия для определения величины массового и валового выброса его загрязнителей атмосферы. Модель должна быть ориентирована на использование в составе информационных систем МЧС объектового уровня, а также в системах экологического мониторинга промышленного предприятия.

Для достижения цели исследования необходимо было решить следующие задачи:

- выполнить классификацию производственного оборудования по способу определения величины массового и валового выброса загрязнителей атмосферы, формируемых в процессе его функционирования;
- разработать математическую модель для определения валового и массового выброса атмосферных поллютантов по каждой группе технологического оборудования;
- предложить и обосновать алгоритм практического использования разработанной математической модели.

### Математическая модель

Модель позволяет определить массовую и валовую величину атмосферных выбросов в зависимости от типа предприятия, количества и вида используемого оборудования, а также от продолжительности и интенсивности его работы. Входной информацией для модели являются принадлежность предприятия к той или иной отрасли народного хозяйства; список вредных веществ, выбрасываемых в атмосферу в процессе функционирования; производственное оборудование, при работе которого образуются вредные вещества; смены и дни работы производственного оборудования; законы распределения дискретных случайных величин, характеризующих моменты его включения и выключения.

Выходными переменными математической модели служат величины массового  $M_i, i = \overline{1, n}$  и валового выброса  $W_i, i = \overline{1, n}$  загрязняющих веществ  $\{Pol_1, Pol_2, \dots, Pol_n\}$ .

Для разработки математической модели предварительно необходимо осуществить классификацию производственного оборудования предприятия по способу расчета величины атмосферных выбросов. Для этого все производственное оборудование, в процессе функционирования которого образуются атмосферные поллютанты, декомпозируется на 10 групп. Для каждой из этих групп при расчете выбросов используются:

- одна из характеристик оборудования, например марка станка;
- удельных эмиссий загрязняющих веществ, приходящихся на единицу массы, длины или объема используемого материала;
- балансовый метод;
- известная интенсивность испарения поллютантов с единицы поверхности, например гальванической ванны;
- методика инвентаризации выбросов, образующихся при производстве радиоэлектронной аппаратуры;
- методика инвентаризации выбросов, образующихся при ремонте резинотехнических изделий;
- способ инвентаризации выбросов, образующихся при проведении медницких работ;
- способ инвентаризации выбросов, образующихся при мойке деталей, узлов и агрегатов;
- алгоритм определения выбросов пыли во время механической обработки древесины;
- методика определения выбросов пыли во время перегрузки сыпучих материалов.

Указанные методики были систематизированы в [2], где они использовались при решении задачи инвентаризации промышленных выбросов в атмосферу. Адаптация этих методик к требованиям разрабатываемой системы имитационного моделирования, в основу которой положен программный продукт Anylogic [3], осуществлена ниже. В частности, при расчете  $M_i, i = \overline{1, n}$  и  $W_i, i = \overline{1, n}$  сделано допущение, что поллютанты от источников загрязнений попадают в помещения, оснащенные газопылеуловителями, работающими без утечек воздуха. Удаление поллютантов производится с помощью местной и общеобменной вентиляции.

Поясним основные этапы формирования имитационной модели на примере оборудования первой и второй группы.

### Определение массового и валового выброса для первой группы оборудования

Расчет ведется по одной из характеристик оборудования. Данный метод расчета величины массового и валового выброса применяется, например, при механической обработке металлов. Определение  $M_i^1, i = \overline{1, n}$  выполняется с использованием справочных данных, приведенных в соответствующих отраслевых методиках [2]. При расчете  $M_i^1, i = \overline{1, n}$  и  $W_i^1, i = \overline{1, n}$  для первой группы оборудования используются следующие зависимости:

$$M_i^1 = M_i^{\text{обмен},1} + M_i^{\text{мест},1}, i = \overline{1, n}; M_i^{0,1} = \left( \sum_{j=1}^{m^1} \eta_j^1 Pas_j^1 \right), i = \overline{1, n},$$

$$M_i^{\text{обмен},1} = M_i^{0,1} (1 - k_{\text{мест}}^1), i = \overline{1, n}; E_i^1 = (1 - c_i^1 / c_i^{0,1}), i = \overline{1, n},$$

$$M_i^{\text{мест},1} = (M_i^{0,1} - M_i^{\text{обмен},1}) (1 - E_i^1), i = \overline{1, n}; W_i^1 = \sum_{j=1}^l M_i^1 \Delta t_j, i = \overline{1, n},$$

где  $M_i^{\text{мест},1}$  – массовое количество  $i$ -го поллютанта, попадающего в газопылеуловители местной вентиляционной системы от  $m^1$  работающих источников загрязнений первой группы оборудования;  $M_i^{0,1}$  – массовое количество  $i$ -го поллютанта, поступившего от работающего оборудования;  $k_{\text{мест}}^1$  – коэффициент эффективности местных вытяжных устройств;  $n$  – количество поллютантов;  $\eta_j^1$  – коэффициент производительности  $j$ -й единицы работающего оборудования первой группы;  $E_i^1$  – степень очистки воздуха газопылеуловителями;  $c_i^1$  – концентрация  $i$ -го поллютанта входе газопылеуловителей;  $c_i^{0,1}$  – концентрация  $i$ -го поллютанта на выходе газопылеуловителей;  $M_i^{\text{обмен},1}$  – массовое количество  $i$ -го поллютанта, не уловленное местными вытяжными устройствами и удаляемое общеобменной вытяжной вентиляцией;  $l$  – количество интервалов времени  $\Delta t_j$ , в течение которых работало оборудование первой группы за год;  $Pas_j^1$  – количество загрязнителей, выбрасываемых в атмосферу  $j$ -й единицей оборудования первой группы; символ «1» в верхнем индексе означает принадлежность к оборудованию первой группы.

В момент решения задачи  $t = t_p$  работа  $j$ -й единицы оборудования первой группы определяется по функции распределения непрерывной случайной величины  $P_j^1 = P_j^1(t)$ , характеризующей вероятностью работы каждой единицы оборудования первой группы на временном интервале решения задачи. Данная зависимость определяется путем обработки экспериментальных данных на стадии адаптации имитационной системы к конкретному производству. Суммирование единиц работающего оборудования позволяет найти  $m^1$ .

### Определение массового и валового выброса для второй группы оборудования

К этой группе относится оборудование сварочного и литейного производства, термообработки металлов, производства деталей способом порошковой металлургии и др.

Расчет ведется по удельным эмиссиям загрязняющих веществ, приходящихся на единицу массы, длины или объема используемого материала. При этом для определения  $M_i^2, i = \overline{1, n}$  и  $W_i^2, i = \overline{1, n}$  используются следующие зависимости:

$$M_i^2 = M_i^{\text{обмен},2} + M_i^{\text{мест},2}, i = \overline{1, n}; M_i^{0,2} = \sum_{j=1}^{F^2} \eta_{ij}^2 Y_{ij}^2 m_j^2 k_j^{\text{мас}}, i = \overline{1, n};$$

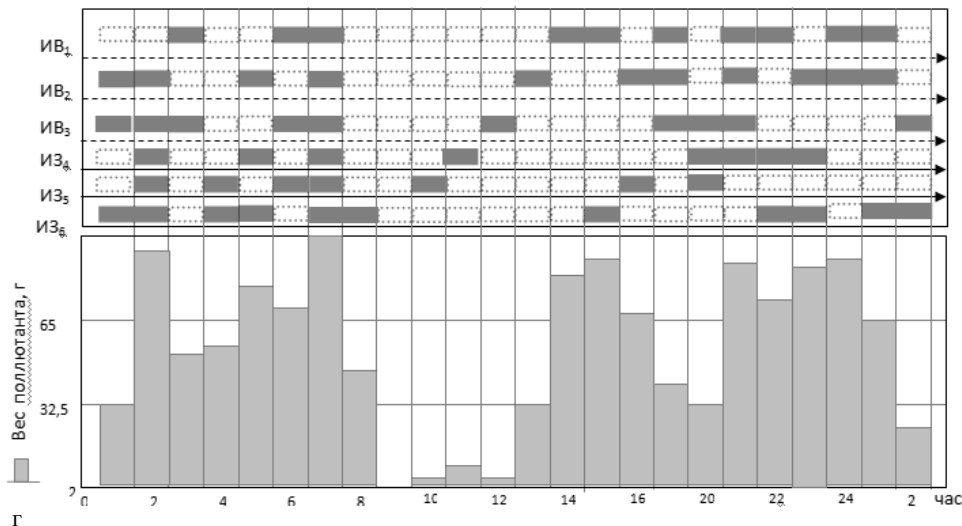
$$M_i^{\text{обмен},2} = M_i^{0,2} (1 - k_{\text{мест}}^2), i = \overline{1, n}; E_i^2 = (1 - c_i^2 / c_i^{0,2}), i = \overline{1, n};$$

$$M_i^{\text{мест},2} = (M_i^{0,2} - M_i^{\text{обмен},2})(1 - E_i^2), i = \overline{1, n}; W_i^2 = \sum_{j=1}^l M_i^2 \Delta t_j, i = \overline{1, n},$$

где  $M_i^{\text{мест},2}$  – массовое количество  $i$ -го поллютанта, попадающего в газопылеуловители местной вентиляционной системы;  $M_i^{0,2}$  – массовое количество  $i$ -го поллютанта, поступившего от работающего оборудования второй группы;  $k_{\text{мест}}^1$  – коэффициент эффективности местных вытяжных устройств;  $E_i^2$  – степень очистки воздуха газопылеуловителями;  $c_i^2$  – концентрация  $i$ -го поллютанта на входе газопылеуловителей;  $c_i^{0,2}$  – концентрация  $i$ -го поллютанта на выходе газопылеуловителей;  $n_j^2$  – коэффициент производительности  $j$ -й единицы работающего оборудования второй группы;  $M_i^{\text{обмен},2}$  – массовое количество  $i$ -го поллютанта, не уловленное местными вытяжными устройствами и удаляемое общеобменной вытяжной вентиляцией;  $l$  – количество интервалов времени  $\Delta t_j$ ;  $Y_{i,j}^2$  – величина удельного выделения атмосферного загрязнителя на единицу массы (длины, или объема)  $j$ -го используемого материала;  $m_j^2$  – количество  $j$ -го материала, перерабатываемого в момент решения задачи  $t = t_p$ ;  $k_j^{\text{мас}}$  – масштабирующий коэффициент, используемый для согласования размерностей;  $F^2$  – количество перерабатываемых материалов; символ «2» в верхнем индексе означает принадлежность к оборудованию второй группы.

При  $t = t_p$  величина  $m_j^2$  определяется по функции распределения непрерывной случайной величины  $P_j^2 = P_j^2(t)$ , характеризующей вероятность переработки  $j$ -го материала на временном интервале решения задачи. Аналогично были построены блоки имитационной модели, определяющие величину массового и валового выброса для остальных восьми групп оборудования.

Для подтверждения возможности практического использования разработанной модели на рисунке приведены результаты вычислительного эксперимента по определению веса поллютантов, поступающих в атмосферу при эксплуатации оборудования второй группы.



Результаты вычислительного эксперимента по определению веса поллютантов, поступающих в атмосферу в течение суток от участка ручной электродуговой сварки штучными электродами

Участок оснащен шестью сварочными постами, являющимися источниками загрязнений: ИВ<sub>1</sub>, ИВ<sub>2</sub>, ..., ИВ<sub>6</sub> соответственно. При сварке использовались электроды ОЗС-4 и УОНИ-13/45. Часовой расход электродов первой марки составлял 1,8 кг, второй – 1,5 кг. В верхней части рисунка пунктиром показаны сварочные посты, отключаемые на соответствующем временном интервале, закрашенные прямоугольники обозначают включаемые посты. До начала моделирования сварка не производилась.

Результаты вычислительного эксперимента, выполненного для оборудования второй группы, подтверждают наличие существенной неравномерности массового выброса атмосферных поллютантов промышленного предприятия на временном интервале одни сутки. Анализ полученных результатов позволяет рекомендовать разработанную модель к использованию в автоматизированных системах экологического контроля и мониторинга, т. к. в них при проведении расчетов часто используются усредненные по месяцам или годам значения величин массового и валового выброса, что снижает точность прогнозирования.

### Алгоритм моделирования

Общий алгоритм использования разработанной имитационной модели при определении массового и валового выброса атмосферных поллютантов имеет следующий вид.

*Начало алгоритма.*

1. Определение загрязняющих веществ  $\{Pol_1, Pol_2, \dots, Pol_n\}$ , для которых необходимо определить величину массового  $M_i, i = \overline{1, n}$  и валового  $W_i, i = \overline{1, n}$  выброса.
2. Выбор интервала моделирования, на котором будут определяться величины массового и валового выброса загрязняющих веществ  $\{Pol_1, Pol_2, \dots, Pol_n\}$ , а также шага моделирования.
3. Определение наименований и количества технологического оборудования, в процессе функционирования которого образуются загрязняющие вещества  $\{Pol_1, Pol_2, \dots, Pol_n\}$ .
4. Отнесение каждой единицы используемого технологического оборудования к соответствующей классификационной группе.
5. Выбор соответствующей имитационной модели для расчета величины массового  $M_i, i = \overline{1, n}$  и валового выброса  $W_i, i = \overline{1, n}$  по каждой группе оборудования.
6. Определение функций распределения непрерывных случайных величин, характеризующих вероятность работы каждой единицы оборудования на временном интервале решения задачи.
7. Расчет величин массового  $M_j$  и валового  $W_j$  выброса загрязняющего вещества  $Pol_j$  для  $i$ -й группы оборудования.
8. Определение величин массового  $M_j$  и валового  $W_j$  выброса загрязняющего вещества  $Pol_j$  по всему предприятию на выбранном шаге моделирования и на всем интервале прогнозирования.
9. Выдача сообщения о величинах массового и валового выброса загрязняющих веществ  $\{Pol_1, Pol_2, \dots, Pol_n\}$  на выбранном интервале моделирования.

*Конец алгоритма.*

Разработанная имитационная модель была использована для определения массового и валового выброса атмосферных загрязнителей предприятия ОАО «СЭПО-ЗЭМ» (г. Саратов), что позволило на интервалах времени 1 месяц и 1 год уменьшить максимальную величину выбросов поллютантов за счет изменения графика работы технологического оборудования. Результаты моделирования и сама модель использовались также при модернизации системы автоматизированного управления производственными процессами ОАО «СЭПО-ЗЭМ». Адаптация имитационной модели к работе в составе информационных систем данного предприятия выполнялась в соответствии с рекомендациями [4–8].

### Заключение

Предложенная имитационная модель процесса образования атмосферных загрязнителей позволяет, в зависимости от используемого технологического оборудования и производственной программы, в динамике определить величину массового и валового выброса различных видов поллютантов, образующихся при функционировании промышленного предприятия. Ис-

пользование данной модели в составе автоматизированных систем экологического мониторинга дает возможность на различных временных интервалах повысить точность прогнозирования загрязнения контролируемых объектов и территорий атмосферными выбросами промышленных предприятий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г. И. Марчук. М.: Наука, 1982. 320 с.
2. Квашнин И. М. Промышленные выбросы в атмосферу. Инженерные расчеты и инвентаризация / И. М. Квашнин. М.: АВОК-PRESS, 2005. 390 с.
3. Кушникова Е. В. Имитационное моделирование загрязнения территорий выбросами промышленных предприятий / Е. В. Кушникова, О. А. Торопова // Проблемы управления в социально-экономических и технических системах: сб науч. ст. по материалам Всерос. науч. конф. Саратов, 2012. С. 20–23.
4. Кушников В. А. Архитектура прикладного программного обеспечения для формального анализа свойств целей и синтеза критериев управления сложными социальными и экономическими системами / В. А. Кушников, Е. В. Кушникова // Вестн. Саратов. гос. техн. ун-та. 2009. № 4 (43), вып. 2. С. 199–201.
5. Аветисян Ю. А. Математические модели и алгоритмы оперативного управления процессами ликвидации чрезвычайных ситуаций / Ю. А. Аветисян, В. А. Кушников, А. Ф. Резчиков, В. А. Родичев // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 11. С. 43–47.
6. Соляник Н. А. Математическое моделирование процесса загрязнения атмосферного воздуха в зоне влияния промышленных предприятий / Н. А. Соляник, В. А. Кушников // Вестн. Саратов. гос. техн. ун-та. 2009. № 1 (37). С. 104–108.
7. Кушников В. А. Управление в человеко-машинных системах с автоматизированной процедурой коррекции целей / В. А. Кушников, А. Ф. Резчиков, А. Д. Цвиркун // Автоматика и телемеханика. 1998. № 7. С. 168–175.
8. Пшеничников И. С. Анализ выполнимости планов мероприятий в системе автоматизированного управления мостостроительной организацией / И. С. Пшеничников, В. А. Кушников, Е. И. Шлычков, Д. Ф. Резчиков // Мехатроника, автоматизация, управление. 2006. № 11. С. 45–49.

Статья поступила в редакцию 15.05.2015,  
в окончательном варианте – 4.08.2015

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Кушникова Елена Вадимовна** – Россия, 410028, Москва; Институт проблем точной механики и управления Российской академии наук; аспирант; iptmuran@san.ru.

**Резчиков Александр Фёдорович** – Россия, 410028, Москва; Институт проблем точной механики и управления Российской академии наук; г-р техн. наук, профессор; член-корреспондент Российской академии наук; директор; iptmuran@san.ru.



*E. V. Kushnikova, A. F. Rezchikov*

**MATHEMATICAL MODEL  
FOR DETERMINATION OF MASS AND GROSS EMISSIONS  
OF ATMOSPHERIC POLLUTANTS OF THE INDUSTRIAL ENTERPRISES**

**Abstract.** In the course of functioning of the processing equipment of the industrial enterprise some tens pollutants causing harmful effects on health of the population, environment, agricultural crops, etc. come to the atmosphere. For minimization of the damage caused by atmospheric pollutants, the issue of the automated control of load distribution between the processing equipment of the enterprise is solved so that the size of damage do not exceed the preset value. For determina-

tion of concentration of pollutants on the controlled objects and territories, the models of advective transfer and diffusion caused by turbulent interaction of air masses are used. These models are based on the assumption that weight emission of pollutants in the atmosphere on all interval of the task solution remains invariable. However, in practice it significantly changes, depending on the changes of the structure and productivity of the working equipment, the production program, etc. The mathematical model, developed for determination of gross and mass emission of atmospheric pollutants of the industrial enterprise, helps determine more precisely the volume of the weight expense of pollutants and, thus, increase the accuracy of the solution of the problem of minimization of damage from atmospheric emissions of the industrial enterprise.

**Key words:** simulation model, emission of pollutants, industrial enterprise, automated control.

#### REFERENCES

1. Marchuk G. I. *Matematicheskoe modelirovanie v probleme okruzhaiushchei sredy* [Mathematical modeling in the environmental issues]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 320 p.
2. Kvashnin I. M. *Promyshlennye vybrosy v atmosferu. Inzhenernye raschety i inventarizatsiia* [Industrial emissions into the atmosphere. Engineering calculations and inventory procedures]. Moscow, AVOK-PRESS, 2005. 390 p.
3. Kushnikova E. V., Toropova O. A. Imitatsionnoe modelirovanie zagriazneniia territorii vybrosami promyshlennykh predpriatii [Simulation of pollution of the territories with emissions of the industrial enterprises]. *Problemy upravleniia v sotsial'no-ekonomicheskikh i tekhnicheskikh sistemakh. Sbornik nauchnykh statei po materialam Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii*. Saratov, 2012. P. 20–23.
4. Kushnikov V. A., Kushnikova E. V. Arkhitektura prikladnogo programmnoho obespecheniia dlia formal'nogo analiza svoistv tselei i sinteza kriteriev upravleniia slozhnymi sotsial'nymi i ekonomicheskimi sistemami [Design of applied software for the formal analysis of the properties of the purposes and synthesis of the criteria of control of complex social and economic systems]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2009, no. 4 (43), iss. 2. 199–201.
5. Avetisian Iu. A., Kushnikov V. A., Rezhnikov A. F., Rodichev V. A. Matematicheskie modeli i algoritmy operativnogo upravleniia protsessami likvidatsii chrezvychainykh situatsii [Mathematical models and algorithms of operational control of the processes of liquidation of the emergent situations]. *Mekhatronika, avtomatizatsiia, upravlenie*, 2009, no. 11, pp. 43–47.
6. Solianik N. A., Kushnikov V. A. Matematicheskoe modelirovanie protsessa zagriazneniia atmosfernogo vozdukha v zone vliianiia promyshlennykh predpriatii [Mathematical modeling of the process of atmospheric pollution in the industrial zone]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2009, no. 1 (37), pp. 104–109.
7. Kushnikov V. A., Rezhnikov A. F., Tsvirkun A. D. Upravlenie v cheloveko-mashinnykh sistemakh s avtomatizirovannoi protseduroi korrektsii tselei [Control in man-machine systems with automated procedure of purpose correction]. *Avtomatika i telemekhanika*, 1998, no. 7, pp. 168–175.
8. Pshenichnikov I. S., Kushnikov V. A., Shlychkov E. I., Rezhnikov D. F. Analiz vypolnimosti planov meropriiitii v sisteme avtomatizirovannogo upravleniia mostostroitel'noi organizatsiei [Analysis of the actualization of the plans in the system of automated control of bridge constructing organization]. *Mekhatronika, avtomatizatsiia, upravlenie*, 2006, no. 11, pp. 45–49.

The article submitted to the editors 15.05.2015,  
in the final version – 4.08.2015

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Kushnikova Elena Vadimovna** – Russia, 410028, Moscow; Institute of Precision Mechanics and Control, Russian Academy of Sciences; Postgraduate Student; iptmuran@san.ru.

**Rezhnikov Alexander Fedorovich** – Russia, 410028, Moscow; Institute of Precision Mechanics and Control, Russian Academy of Sciences; Doctor of Technical Sciences, Professor; Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences; Director; iptmuran@san.ru.

