

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ ВЫБРОСОВ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Петров Ю.С., Соколов А.А.

*Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), г. Владикавказ*

В результате исследований авторов по вопросам моделирования и распространения техногенных выбросов предприятий горно-металлургического комплекса были использованы методы электрогидродинамической аналогии, способы электрического моделирования в программе Electronics Workbench и визуализация модулем разработанной подсистемы анализа, управления и принятия решений. В статье представлено описание способа моделирования фильтрации техногенных выбросов, через водопроницаемые пласты промышленно-техногенной системы. Приводится анализ географического распределения выбросов на территории системы и скриншоты программы, для расчета потоков грунтовых вод, содержащих техногенные выбросы предприятий горно-металлургического комплекса. В дальнейшем планируется реализовать контроль над технологическими циклами для регулирования объемов техногенных выбросов в режиме on-line, за счет новой системы управления и принятия решений.

Ключевые слова: промышленно-техногенная система, техногенные выбросы, анализ, электрическая модель, виртуальное моделирование.

## MODELLING AND ANALYSIS OF DISTRIBUTION OF TECHNOGENIC EMISSIONS OF MINING AND METALLURGICAL COMPLEX

Petrov Y.S., Sokolov A.A.

*North Caucasian mining and metallurgical institute (the state technological university)*

As a result of researches of authors concerning modeling and distribution of technogenic emissions of the enterprises of mining and metallurgical complex, methods of electrohydrodynamic analogy, ways of electric modeling in the Electronics Workbench program and visualization by the module of the developed subsystem of the analysis, management and decision-making were used. The description of a way of modeling of a filtration of technogenic emissions is presented in article, through water-permeable layers of industrial and technogenic system. The analysis of geographical distribution of emissions on territories of system and program screenshots, for calculation of streams of the ground waters containing technogenic emissions of the enterprises of mining and metallurgical complex is provided. Further it is planned to realize control over production cycles for regulation of volumes of technogenic emissions in the on-line mode, at the expense of a new control system and decision-making.

Keywords: industrial and technogenic system, technogenic emissions, analysis, electric model, virtual modeling.

**Введение.** Для вывода нового эффективного способа моделирования фильтрационного потока, содержащего техногенные загрязнения, участки промышленно-техногенной системы (ПТГС), через которые осуществляется фильтрация, предлагается разделять на подсистемы по коэффициенту фильтрации и разности гидравлических уклонов. В результате детализации получается сеточный вид участков ПТГС, который можно описывать математическими методами с использованием теории матриц и теории электрических цепей, предполагая, что участки подсистемы и их аналоги – участки электрической цепи характеризуются взаимно однозначными параметрами (табл. 1) [11].

Предложенный метод расчета и модели распространения техногенных выбросов разработан с использованием основ электрогидродинамической аналогии и математических

методов, теоретической электротехники [1, 2]. В уравнениях состояния электрической цепи – аналога гидравлического участка системы используется аналогия между величинами стационарного электрического поля в проводящей среде и величинами стационарного поля фильтрации жидкости.

Таблица 1

Основные положения электрогидродинамической аналогии.

| Основные уравнения и характеристики                                                               |                                                                                 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| Стационарное поле плотности тока<br>в проводящей среде                                            | Стационарное поле фильтрации жидкости                                           |
| $\operatorname{div} \vec{j} = 0$ $\operatorname{rot} \vec{E} = 0 ; \vec{\delta} = \sigma \vec{E}$ | $\operatorname{div} \vec{v} = 0$ $\operatorname{rot} \frac{1}{K_F} \vec{v} = 0$ |
| $I = \int_S \vec{\delta} d\vec{s}$                                                                | $Q = \int_S \vec{v}_F d\vec{s}$                                                 |
| $\vec{\delta} = -\sigma \operatorname{grad} \varphi$ (закон Ома)                                  | $\vec{v}_F = -K_F \operatorname{grad} h$ (закон Дарси)                          |
| $\varphi$ – электрический потенциал, В                                                            | $H$ – пьезометрический напор, м                                                 |
| $\vec{\delta}$ – плотность тока, А/м <sup>2</sup>                                                 | $\vec{v}_F$ – скорость фильтрации, м/сут.                                       |
| $\sigma$ – удельная электропроводность, См/м                                                      | $K_F$ – коэффициент фильтрации, м/сут.                                          |
| $I$ – сила тока, А                                                                                | $Q$ – фильтрационный расход, м <sup>3</sup> /сут.                               |

**Материалы и методы.** В предлагаемом способе моделирования используется возможность перехода от уравнений поля к уравнениям объектов с сосредоточенными параметрами (от стационарного поля плотности тока в проводящей среде к электрическим цепям с сосредоточенными параметрами и от стационарного поля фильтрации жидкости к гидравлическим цепям с сосредоточенными параметрами).

В этом случае будут использованы аналогии между силой тока  $I$  фильтрационным расходом  $Q$ , между разностью электрических потенциалов  $\Delta\varphi$  (падением напряжения  $U(B)$ ) и разностью пьезометрических напоров  $\Delta h$  (гидравлическим уклоном) – разности между пьезометрическими напорами  $h_1$  и  $h_2$  в начале и в конце исследуемого участка к длине этого участка  $l$ , а также между удельной электропроводностью  $G$  и коэффициентом фильтрации  $K_F$ .

В процессе моделирования рассматривается система водопроницаемых пластов, в которых происходит фильтрация и в которых заданы структура пластов, определенная в

результате реального разреза, коэффициенты фильтрации пластов и общий гидравлический уклон.

Основой моделирования является аналогия между законами Ома и законом Дарси, причем эти законы, относящиеся соответственно к скорости фильтрации и к плотности тока (строка 3 табл. 1), преобразуются в законы, использующие фильтрационный расход и силу тока путем умножения обеих частей уравнений на единицу площади, в предположении, что площадь фильтрации перпендикулярна фильтрационному потоку.

$$S [M^2] \cdot \vec{\delta} \left[ \frac{A}{M^2} \right] = -\sigma \left[ \frac{Cm}{M} \right] grad \varphi \left[ \frac{B}{M} \right] \cdot S [M^2] \quad (1)$$

$$S [M^2] \cdot \vec{v}_F \left[ \frac{M}{сутки} \right] = -K_F \left[ \frac{M}{сутки} \right] grad h \left[ \frac{M}{M} \right] \cdot S [M^2] \quad (2)$$

откуда

$$I [A] = G [Cm] \cdot U [B] \quad (3)$$

$$Q \left[ \frac{M^3}{сутки} \right] = K_{F_{OE}} \left[ \frac{M^3}{сутки} \right] \cdot J_{ГВ} \quad (4)$$

Далее при переходе от электрической модели к модели поля фильтрации жидкости (и наоборот) были использованы масштабные коэффициенты, определенные из начальных условий.

За аналог расхода фильтрационного потока  $Q$  на заданном участке пласта принимаем силу электрического тока  $I$  (показания амперметра) на соответствующем участке электрической цепи

$$Q = m_Q \cdot I, \quad (5)$$

где  $m_Q$  – масштабный коэффициент фильтрационного расхода фильтрации,  $\frac{M^3}{сут. \cdot A}$ .

За аналог приведенного коэффициента фильтрации (характеризующего фильтрацию на единице площади) на исследуемом участке грунта принимаем приведенную электрическую проводимость на участке цепи  $G$

$$K_{F_{OE}} = m_{K_{F_{OE}}} G, \quad (6)$$

где  $m_{K_{F_{OE}}}$  – масштабный коэффициент приведенного коэффициента фильтрации  $\left( \frac{M^3}{сутки \cdot Cm} \right)$ .

За аналог величины гидравлического уклона на участке грунта принимаем величину напряжения  $U$  на участке цепи

$$J_{ГВ} = m_{J_{ГВ}} U, \quad (7)$$

где  $m_{J_{ГВ}}$  – масштабный коэффициент гидравлического уклона  $(B^{-1})$ .

Подставив в формулу (4) значения параметров через масштабные коэффициенты можно получить соотношение:

$$m_Q m_k^{-1} m_{Гу}^{-1} = 1 \quad (8).$$

В процессе моделирования предполагалось, что коэффициенты фильтрации, характеризующие участки пластов, оставались постоянными, и для случая фильтрующейся жидкости вследствие выпадения осадков определялся возможный фильтрационный расход.

Для моделирования фильтрации осадков, содержащих техногенные выбросы горно-металлургического комплекса, был выбран разрез Северо-Осетинской равнины, где расположена исследуемая промышленно-техногенная система, с территорией, прилегающей к промышленным предприятиям ОАО «Электроцинк» и ОАО «Победит». На рис. 1 показан разрез с водопроницаемыми пластами, через которые осуществляется фильтрация грунтовых вод.

В табл. 1 приведены гидрогеологические характеристики водопроницаемых пластов на исследуемом участке с учетом [3], при этом коэффициент фильтрации пласта в дальнейшем был использован как аналог электрических проводимостей на электрической модели [4].

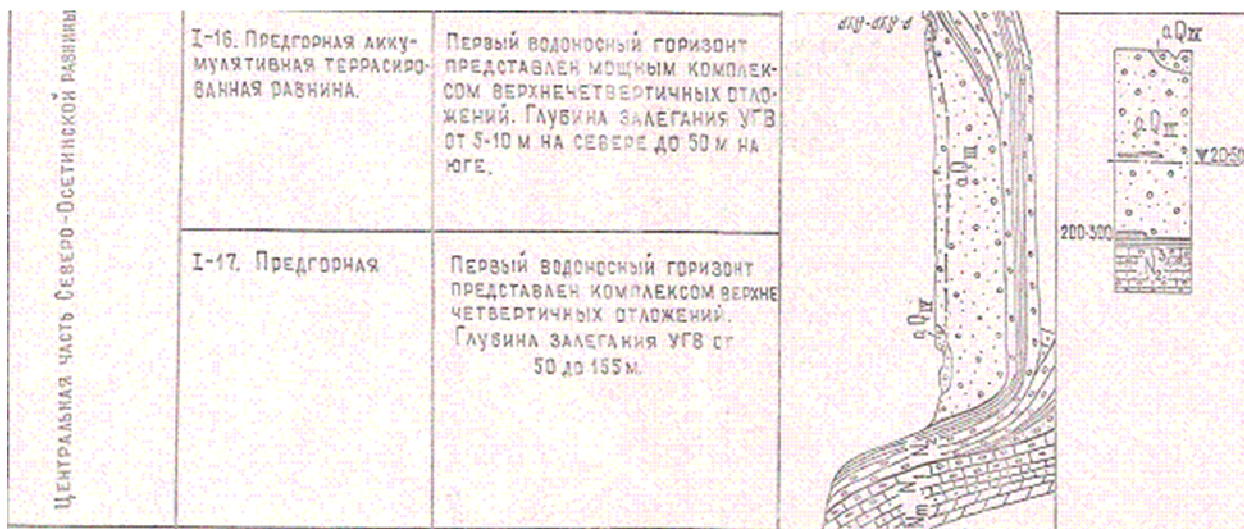


Рис. 1. Разрез центральной части Северо-Осетинской равнины, на которой расположена исследуемая промышленно-техногенная система

В настоящее время аналоговое моделирование может быть без потери качества эксперимента заменено виртуальным моделированием исследуемых процессов, поэтому авторы с учетом всех специфических особенностей решаемых задач для моделирования и расчета скорости фильтрационных потоков, содержащих техногенные загрязнения, использовали программу ElectronicsWorkbench.

На основе данных разреза по рис. 1 была составлена схема электрической модели, аналога разреза водопроницаемых пластов, представленная на рис. 2, и выполнен ее расчет. Полученные данные токов – аналогов фильтрационных расходов потоков грунтовых вод, содержащих техногенные загрязнения, хорошо согласуются с данными полевых экспериментальных исследований авторов [5,6] разработанными техническими средствами.

Так как ресурсы программы Electronics Workbench не позволяют использовать проводимости  $G$ , то в программе используются электрические сопротивления  $R$ , числовые значения которых пересчитаны для данных табл. 1, принадлежащие проводимостям водопроницаемых пластов. Гидравлический уклон на исследуемом участке площадью  $1 \text{ км}^2$  составляет 100 м и представлен на электрической схеме рис. 2 источником напряжения 100 В. С учетом вышеизложенного материала, по показаниям амперметров, установленных в каждой ветви схемы на рис. 2, можно определить расход фильтрационных потоков на участках исследуемой территории и произвести системный анализ фильтрационных расходов потоков, содержащих загрязнения, в каждом водопроницаемом пласте исследуемого участка, а следовательно, выполнить прогноз о распространении вредных выбросов по территории промышленно-техногенной системы грунтовыми водами.

Таблица 2

Сводные данные для моделирования в программе ElectronicsWorkbench фильтрации через водопроницаемые пласты разреза на рисунке 1.

| Грунт                 | Значения коэффициентов фильтрации водопроницаемых пластов исследуемого разреза и соответствующих им значений электрических проводимостей и сопротивлений электрической модели |                                        |                           |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------|
| Водопроницаемый пласт | Коэффициент фильтрации пласта<br>$K_F$ , м/сут.                                                                                                                               | Проводимость<br>$G$ , Ом <sup>-1</sup> | Сопротивление<br>$R$ , Ом |
| Песчаные грунты       | 0,6–60                                                                                                                                                                        | $G_1=22$                               | $R_1=0,045$               |
|                       |                                                                                                                                                                               | $G_2=11$                               | $R_2=0,09$                |
|                       |                                                                                                                                                                               | $G_3=5$                                | $R_3=0,2$                 |
|                       |                                                                                                                                                                               | $G_4=2$                                | $R_4=0,5$                 |
|                       |                                                                                                                                                                               | $G_5=8$                                | $R_5=0,125$               |
|                       |                                                                                                                                                                               | $G_6=17$                               | $R_6=0,059$               |
|                       |                                                                                                                                                                               | $G_7=14$                               | $R_7=0,071$               |
|                       |                                                                                                                                                                               | $G_8=4$                                | $R_8=0,25$                |
|                       |                                                                                                                                                                               | $G_9=15$                               | $R_9=0,067$               |
| Супеси                | 0,01–1,0                                                                                                                                                                      | $G_{10}=0,5$                           | $R_{10}=2$                |

|          |           |                |                |
|----------|-----------|----------------|----------------|
|          |           | $G_{11}=0,2$   | $R_{11}=5$     |
|          |           | $G_{12}=0,3$   | $R_{12}=3,33$  |
|          |           | $G_{13}=0,1$   | $R_{13}=10$    |
|          |           | $G_{14}=0,9$   | $R_{14}=1,11$  |
|          |           | $G_{15}=0,7$   | $R_{15}=1,43$  |
|          |           | $G_{16}=0,4$   | $R_{16}=2,5$   |
|          |           | $G_{17}=0,05$  | $R_{17}=20$    |
| Суглинки | 0,005–1,0 | $G_{18}=0,03$  | $R_{18}=33,3$  |
|          |           | $G_{19}=0,08$  | $R_{19}=12,5$  |
|          |           | $G_{20}=0,06$  | $R_{20}=16,67$ |
|          |           | $G_{21}=0,04$  | $R_{21}=25$    |
|          |           | $G_{22}=0,02$  | $R_{22}=50$    |
|          |           | $G_{23}=0,09$  | $R_{23}=11,1$  |
|          |           | $G_{24}=0,005$ | $R_{24}=200$   |

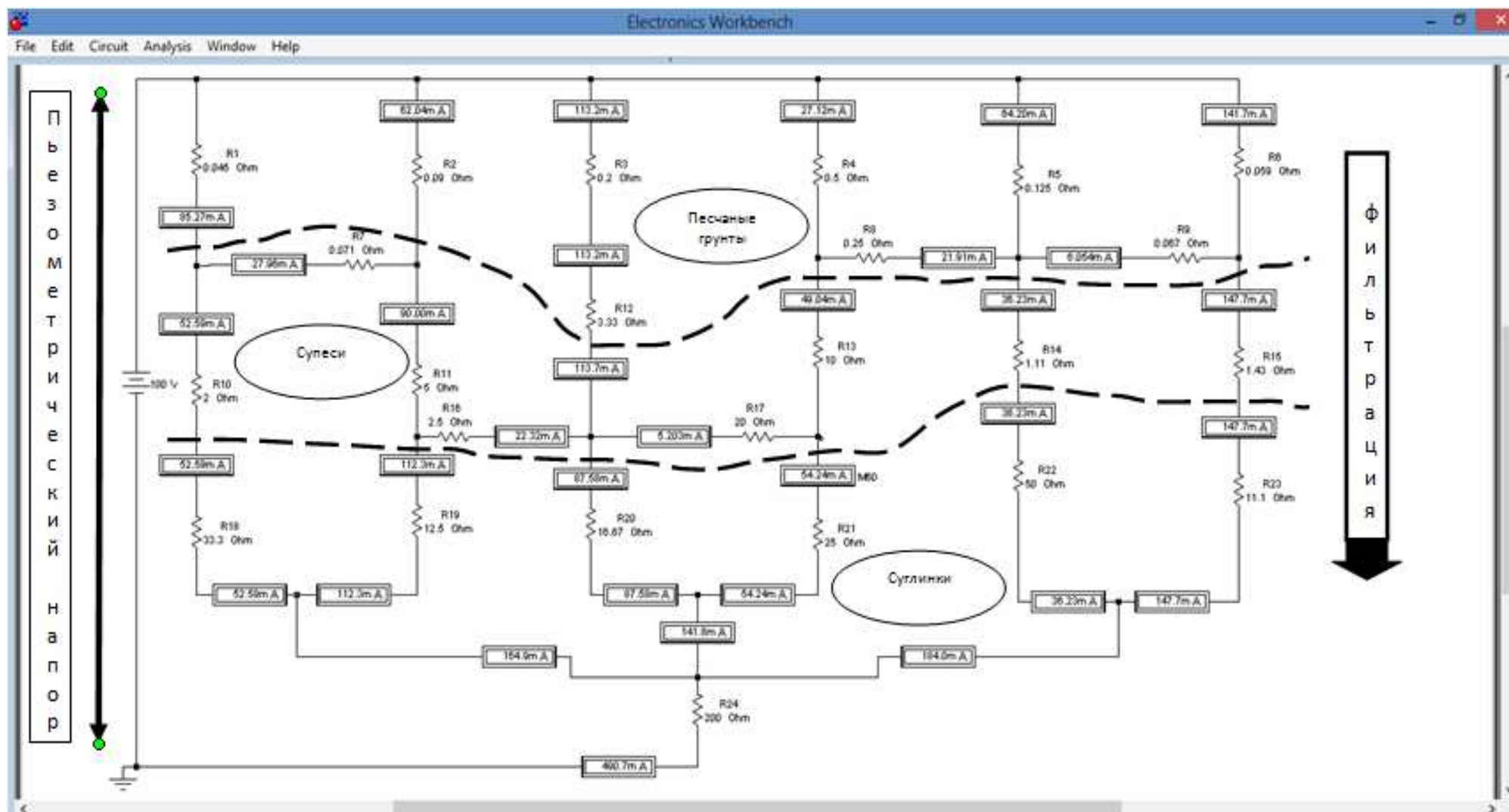


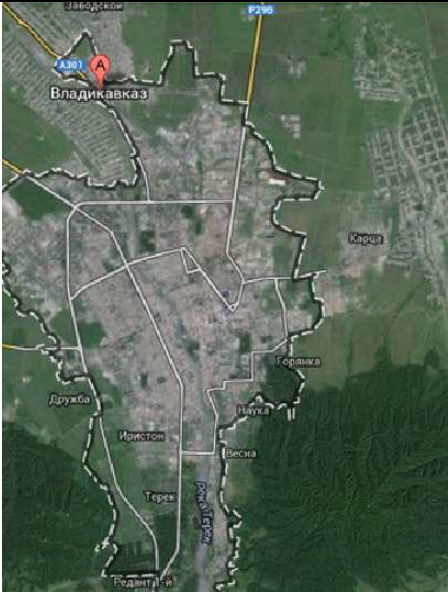
Рис. 2. Скриншот виртуального моделирования фильтрации через водопроницаемый пласт



Следует иметь в виду, что для иных случаев необходимо в процессе моделирования соблюдать физическое, кинематическое и динамическое подобие и учитывать индивидуальные для каждого эксперимента масштабные коэффициенты. В табл. 3 показаны загрязненные участки в промышленно-техногенной системе г.Владикавказ, рассчитанные по предложенной методике и взятые скриншотами из программ, с которыми уверенно работает предложенная авторами система анализа, управления и принятия решений [6–8]. Для визуализации распространения техногенных выбросов и анализа их географического распределения была задействованная разработанная ранее геоинформационная система [9, 10].

Таблица 3

Представление исследуемой территории в различных вариантах, используемых для анализа состояния системы

| Фото спутник                                                                       | Карта                                                                               | Схема распространения техногенных выбросов                                           |
|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                                                                                  | 2                                                                                   | 3                                                                                    |
|  |  |  |

**Результаты исследований и их обсуждение.** Таким образом, предложенная методика позволяет при наличии информации по гидрогеологическим характеристикам водопроницаемых пластов и объемам вредных выбросов промышленного предприятия определять потоки грунтовых вод, содержащих техногенные выбросы, и соответственно распределение загрязнений в грунтах промышленно-техногенной системы. Новый метод моделирования и анализа обработки информации и управления сложными системами повышает эффективность, качество и надежность сложных промышленных систем.



**Выводы.** В ходе исследований была расширена возможность применения электрогидродинамической аналогии, предложены новые схемы для электрического и виртуального моделирования, применение которых в блоке постоянно-действующих моделей системы анализа, управления и принятия решений и увеличивает эффективность анализа, обработки и визуализации информации по техногенному циклу промышленного предприятия.

### Список литературы

1. Жернов И.Е., Шестаков В.М. Моделирование фильтрации подземных вод. – М.: Недра, 1971.
2. Королев В.А. Водопроницаемость грунтов / Российская геологическая энциклопедия. – в 3 т. – Т. 1 (А-И). – М.; СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2010.
3. Купалян С.Д. Теоретические основы электротехники, ч.3, Электромагнитное поле. – М., 1970, 248 с. ил.
4. Соколов А.А., Соколова О.А. Реализация теории и методов мониторинга подземных вод на сеточных моделях участков экосистем как объектов с распределенными параметрами // Проблемы региональной экологии. – 2009. – № 3. – С. 138–141.
5. Соколов А.А., Соколова О.А., Соколова Е.А. Разработка стенда для исследования и моделирования экологических рисков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) = Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal). – 2009. – № 7. – С. 169–172.
6. Соколов А.А., Соколова Е.А. К проблеме повышения эффективности комплексной оценки влияния промышленных объектов на экосистемы // Экология урбанизированных территорий. – 2009. – № 3. – С. 42–43.
7. Соколов А.А. Исследование влияния промышленных объектов на окружающие экосистемы разработанными техническими средствами // Перспективы науки. – 2010. – № 4. – С. 110–113.
8. Соколов А.А. Разработка новых методов и средств анализа обработки информации и управления сложными природно-техническими системами // Доклады Московского общества испытателей природы. – М., 2010. – Т. 44.
9. Соколов А.А., Соколова Е.А. Геоинформационная система экологических рисков. Патент на полезную модель RU 87280 от 22.06.2009.
10. Соколов А.А., Соколова Е.А. Анализ работы алгоритмов компрессии для сокращения объема цифровой информации // Перспективы науки. – 2010. – № 7. – С. 93–96.

11. Фильдчаков П.Ф., Панчишин В.И. Интеграторы ЭГДА. Моделирование потенциальных полей на электропроводящей бумаге. – Киев: Типография Издательства АН УССР, 171 с.

**Рецензенты:**

Лолаев А.Б., д.т.н., профессор, и.о. директора, Северо-Осетинский филиал ОАО «МРСК Северного Кавказа», г. Владикавказ.

Сорокер Л.В., д.т.н., профессор, Научно-производственный комплекс «Югцветметавтоматика», г. Владикавказ.

Пачурин Герман Васильевич, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Производственная безопасность и экология» (ПБиЭ), Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород.