



related mechanical properties of human skin: an in vivo study // J. Investigative Dermatology. 1989. V. 93, № 3. P. 353–357.

4. *Reihsner R., Balogh B., Menzel E.J.* Two-dimensional elastic properties of human skin in terms of an incremental model at the in vivo configuration // J. Med. Eng. Phys. 1995. V. 17, No. 4. P. 304–313.

5. *Danielson D.A.* Human skin as an elastic membrane // J. Biomechanics. 1973. V. 6. P. 539–546.

6. *Tong P., Fung Y.C.* The stress-strain relationship for the skin // J. Biomechanics. 1976. V. 9. P. 649–657.

7. *Veronda D.R., Westmann R.A.* Mechanical characterization of skin-finite deformations // J. Biomechanics. 1970. V. 3. P. 111–124.

8. *Федоров А.Е., Лохов В.А.* О применении теории вяз-

коупругости в эстетической хирургии // Рос. журн. биомеханики. 2003. Т. 7, № 4. С. 32–43.

9. *Федоров А.Е., Самарцев В.А., Кириллова Т.А.* О механических свойствах человека // Рос. журн. биомеханики. 2006. Т. 10, № 2. С. 29–42.

10. *Циглер Ф.* Механика твердых тел и жидкостей. Ижевск; М.: РХД, 2002.

11. *Адамов А.А., Матвеев В.П., Труфанов Н.А., Шардаков И.Н.* Методы прикладной вязкоупругости. Екатеринбург: УрО РАН, 2003.

12. *Селезнев С.А., Шульпина В.В.* Механические свойства кожи передней поверхности туловища человека // Биомеханика кровообращения, дыхания и биологических тканей. Рига: Зинатне, 1981. С. 268–271.

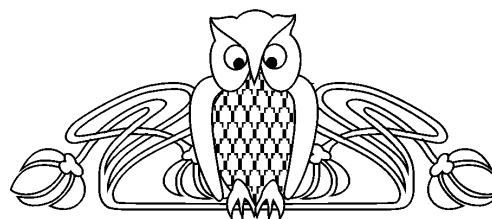
УДК 681.5.017

## ОЦЕНКА СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ СЕТИ МОНИТОРИНГА ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА

В.О. Черванев

Уральский государственный горный университет,  
кафедра информатики  
E-mail: victor\_ua@pochta.ru

Приводится методика оценки существующей структуры и параметров наблюдательной сети на основе результатов имитационного моделирования, проведенного с использованием диффузионной математической модели переноса примеси с учетом введенных ограничений.



**Estimation of Structure and Parameters of the Atmospheric Air  
Pollution Monitoring Observant Network**

V.O. Chervanov

The estimation procedure of existing structure and parameters of the observant network on basis of results of the imitating model with use of diffusion mathematical model of impurity carrying in view of restrictions is given.

### 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОЦЕНКИ СУЩЕСТВУЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ СЕТИ

Задача оценки существующей структуры и параметров наблюдательной сети формулируется следующим образом.

Известна структура и параметры источников загрязнения  $M(G_i)$ , т.е. пространственное расположение и параметры стационарных источников загрязнения (высота труб, объемы выбросов и концентрация в них загрязняющих веществ). Кроме того, известны: значения предельно-допустимых выбросов (ПДВ), существующая структура и параметры наблюдательной сети  $H(G_i)$ , в том числе типы наблюдательных постов, их пространственное расположение, перечень контролируемых параметров, интервалы дискретности наблюдения, погрешности наблюдения, а также метеоусловия (скорость и направление ветра, величина атмосферного давления, влажность воздуха).

Известно, что вероятность экологически обусловленных заболеваний зависит от частоты, уровня и продолжительности превышения предельно-допустимой концентрации (ПДК); тогда качество мониторинга определяется потерями от пропусков обнаружения превышений ПДК.

Вероятность пропуска событий может быть найдена путем имитационного моделирования (ИМ). ИМ заключается в генерации выбросов загрязняющих веществ конкретными источниками; расчете концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе с учетом динамики их распространения при известных метеоусловиях и сопоставлении рассчитанных концентраций с допустимыми нормами в точках расположения наблюдательных постов.

Использование полученных результатов ИМ позволяет решить тактическую и стратегическую задачи, связанные с мониторингом загрязнения атмосферного воздуха. Тактическая задача заключается в оценке (при существующей структуре и параметрах наблюдательной сети) качества мониторинга загрязнения атмосферного воздуха по вероятности обнаружения выбросов от стационарных источников загрязнения, превышающих ПДВ. Низкая эффективность обнаружения выбросов от источников загрязнения при существующей структуре и параметрах наблюдательной сети является предпосылкой решения стратегической задачи. Стратегическая задача заключается в обосновании структуры



и параметров наблюдательной сети, обеспечивающей минимум потерь, обусловленных наличием в определенные периоды времени концентраций загрязняющих веществ в воздухе населенного пункта, превышающих ПДК.

Ниже рассматривается постановка тактической задачи при следующих допущениях.

1. Полагаем, что известно взаимное расположение стационарных источников загрязнения и стационарных наблюдательных постов.

2. Полагаем, что стационарные источники загрязнения могут работать либо генерируя постоянные выбросы в атмосферу, либо в импульсном режиме. Причем длительность импульса, соответствующая выбросу загрязнителя, превышающему ПДВ, оказывается существенно меньше длительности паузы между импульсами. Характер этих выбросов определяется технологическими особенностями функционирования объектов — источников загрязнения.

3. Полагаем, что метеоусловия определяются по результатам наблюдения на нескольких метеопостах. В качестве примера нами использованы результаты наблюдений скорости и направления ветра на трех метеопостах, установленных в городах Первоуральске, Екатеринбурге и Ревде. Результаты наблюдения на метеопостах были сегментированы как по направлению ветра с шагом в 15 град., так и по скорости ветра с шагом в 0,5 м/с. В результате сегментации получены вероятности для всех значений скорости и направления ветра. В силу повторяемости метеоусловий полученные результаты могут быть распространены на любой период моделирования.

4. Полагаем, что режим  $i$ -го источника загрязнения описывается дискретными ступенчатыми функциями  $\Delta u_i$ . Тогда наблюдаемые концентрации загрязнителей на стационарных наблюдательных постах (СНП) могут быть записаны в виде  $x(t + \tau) = \sum_i g_{xu}(\tau) \cdot \Delta u_i(t)$ , где  $g_{xu}(\tau)$  — импульсная переходная функция, связывающая импульсные воздействия источника загрязнения с концентрацией загрязнителя, измеренной на СНП.

Полагаем также, что вероятность одновременного изменения направления и скорости ветра, а также интенсивности выброса пренебрежимо мала.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

В соответствии с принятыми допущениями была выполнена серия вычислительных экспериментов.

Цель эксперимента:

- показать принципиальную возможность обнаружения источника загрязнения, нарушающего предельно-допустимые объемы выброса при различных режимах работы источников загрязнения;
- оценить качество системы мониторинга, состоящей из нескольких постов наблюдения при различных режимах работы источников загрязнения;
- оценить вероятность обнаружения выброса от источника загрязнения при известных метеоусловиях.

В результате решения прямой задачи распространения выбросов от стационарных источников загрязнения при конкретных метеоусловиях получены оценки расчетных значений концентрации загрязнителей в узлах наблюдательной сети, покрывающей исследуемую территорию. Расчет производили на сетке с ячейкой  $200 \times 200$  м с шагом по времени в 2 мин. При расположении наблюдательных постов в каждом узле наблюдательной сети превышение источниками ПДВ будет гарантировано обнаружено.

Требуется определить вероятность пропуска события за определенный промежуток времени, заключающегося в превышении источником ПДВ, при разряженной сети наблюдения, соответствующей фактическому расположению наблюдательных постов на исследуемой территории. Вероятности пропусков событий вычисляются как отношение числа пропущенных событий, длительность каждого из которых не менее интервала дискретности наблюдений, к общему числу событий, заключающихся в превышении источником ПДВ.

Формальной физико-математической основой моделирования для прямой задачи являются: уравнение непрерывности потока загрязнения; уравнение движения Эйлера для воздушной среды; уравнение состояния среды и ряд краевых или граничных условий [1–3]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \text{div}(C\vec{V}) = f, \quad \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V}, \text{grad})\vec{V} + \frac{1}{\rho} \text{grad}P = 0, \quad P\rho^{-\chi} = \text{const}, \quad \chi = \frac{c_P}{c_v}, \quad (1)$$

где  $V(x, t) = (V_x, V_y, V_z)$  — вектор скорости движения воздушной среды, который подчиняется второму уравнению системы (1). Скорости движения воздушной среды получены путем наблюдения на сети метеорологических станций и постов;  $C(x, t)$  — концентрация изучаемого компонента загрязнения;  $\rho(x, t)$  — плотность воздушной среды;  $P(x, t)$  — давление,  $f(x, t)$  — интенсивность источников



загрязнения (в данном случае функция учитывает также поглощение загрязнения средой),  $c_p, c_v$  — удельные теплоемкости газа соответственно при постоянном давлении и постоянном объеме.

Граничные условия обычно принимаются в следующем виде:  $\frac{\partial C(x, t)}{\partial n} = 0 \Big|_G$ . При этом область распространения загрязнения ограничена поверхностями  $G$ , которая образована снизу рельефом местности, сверху априорно выбранным уровнем  $H$ , а с боков — вертикальными плоскостями. Для верхнего уровня  $H$  концентрация загрязнения пренебрежимо мала (или на  $H$  обеспечиваются условия изоляции слоя). На удаленных от источников боковых вертикальных гранях исследуемой области при отсутствии трансграничного переноса можно принять это же условие.

Дифференциальное уравнение переноса примеси, первое уравнение системы (1), в скалярной форме с детализацией структуры источников можно записать в следующей форме:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -u \frac{\partial C}{\partial x} - v \frac{\partial C}{\partial y} - w \frac{\partial C}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial C}{\partial z} \right) + F + R - P - W,$$

где  $F$  — интенсивность источников загрязнения;  $R$  — скорость образования загрязнения за счет химических реакций;  $P$  — скорость уничтожения загрязнения за счет химических реакций;  $W$  — скорость выпадения примеси на подстилающую поверхность;  $C$  — объемная концентрация загрязнения;  $u, v, w$  — компоненты скорости ветра;  $k$  — коэффициент атмосферной диффузии.

Граничные условия детализируются в виде

$$z = H_{\max}, \quad C = 0, \quad k \frac{\partial C}{\partial z} = 0, \quad z = 0, \quad k \frac{\partial C}{\partial z} + wC = \beta C,$$

где  $\beta$  — коэффициент аккомодации, или поглощения, на поверхности осаждения (зависит от характера поверхности, например, лес, водоем, поле, застройки различной этажности и др.). В приближении двумерной  $(x, y)$  задачи переноса и постоянном коэффициенте диффузии  $k$ , а также без учета  $R, P$  основное уравнение можно записать в виде

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -u \frac{\partial C}{\partial x} - v \frac{\partial C}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial C}{\partial y} \right) - \beta C + F.$$

К этому уравнению на достаточно малых сетках по  $(x, y, t)$  применим метод простых итераций. При известных функциях скорости ветра  $V = (u, v)$  мощности действующих стационарных источников  $F(x, y, t)$  и параметрах  $k, \beta$  этот метод сходится достаточно быстро

$$C^{(n+1)} = \Delta t \left[ -u \frac{\partial C^{(n)}}{\partial x} - v \frac{\partial C^{(n)}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial C^{(n)}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial C^{(n)}}{\partial y} \right) - \beta C^{(n)} + F \right],$$

где  $n, n + 1$  — последовательные шаги вычисления.

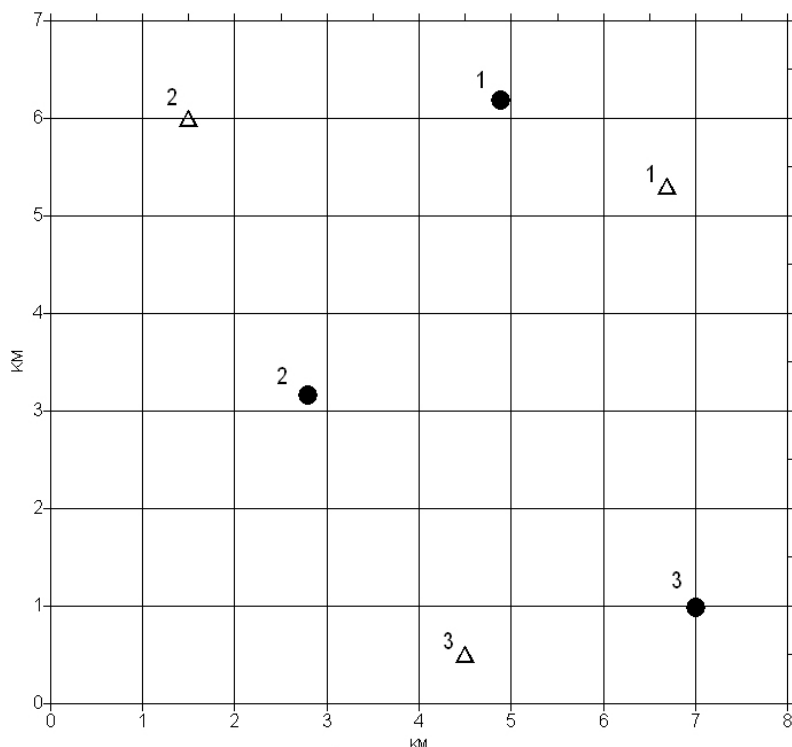
Отметим, что здесь шаг по времени  $\Delta t$  может не совпадать с временным интервалом, применяемым для визуализации отдельных сцен и должен быть намного меньше.

На рисунке представлена возможная схема взаимного расположения стационарных источников загрязнения и постов наблюдения. Расположение источников загрязнения и поста наблюдения № 1 соответствует существующему в г. Первоуральске; расположение постов наблюдения № 2 и 3 выбрано произвольно. В соответствии с планом вычислительного эксперимента задавались различные режимы работы источников загрязнения (табл. 1) и рассчитывались поля концентрации СО на исследуемой территории. Расчет концентраций проводился для равномерного режима работы источников загрязнения в условиях изменения скорости и направления ветра согласно статистическим данным, рассчитанным по трем постам.

Таблица 1

Режимы работы источников загрязнения в вычислительных экспериментах

№ п/п	Объем выброса (ед. ПДВ) номер источника загрязнения			Режим работы источника загрязнения	Количество постов наблюдения
	1	2	3		
1	1	0	0	Равномерный	1
2	0	1	0	Равномерный	1
3	0	0	1	Равномерный	1
4	1	0	0	Равномерный	3
5	0	1	0	Равномерный	3
6	0	0	1	Равномерный	3



Взаимное расположение источников загрязнения и постов наблюдения  
 ● — источник загрязнения, Δ — пост наблюдения

Для упрощения расчетов, в качестве нулевого уровня концентрации СО была выбрана концентрация СО при условии равномерного режима работы всех источников загрязнения с объемом выброса 1 ПДВ — фоновый уровень. Также в качестве нулевого уровня объема выброса источником загрязнения был принят уровень в 1 ПДВ.

Далее производился анализ концентрации СО в точках, соответствующих координатам расположения наблюдательных постов. При существовании выброса источником загрязнения (табл. 1), отсутствия обнаружения в определенном узле сети концентрации заданного уровня происходит пропуск события.

Обнаружение и пропуск выбросов рассчитывались для случаев системы наблюдения, состоящей из одного наблюдательного поста (№ 1 на рисунке) или из трех постов (в этом случае считаем, что при существовании выброса от источников загрязнения (табл. 1) и отсутствии, хотя бы в одном из трех СНП, концентрации заданного уровня происходит пропуск события). Соответственно для каждого наблюдательного поста существует два состояния: 1 — произошло обнаружение выброса, 0 — произошел пропуск выброса. С учетом скорости и направления ветра мы можем вычислить вероятность обнаружения выброса для известных метеоусловий и оценить вероятность обнаружения выброса в целом для данной системы наблюдения.

Таким образом, вероятность обнаружения выброса системой наблюдения вычисляется как произведение вероятности определенной скорости и направления ветра и вероятности наличия выброса источником загрязнения.

Сумма вероятностей обнаружения выброса для всех значений скорости и направления ветра являются вероятностью обнаружения выброса системой наблюдения в целом. Оценка вероятности обнаружения выброса системой наблюдения, состоящей из одного или трех постов наблюдения приведена в табл. 2.

Таблица 2  
 Оценка вероятности обнаружения выброса

Тип выброса	Номер источника нарушителя	Количество постов наблюдения	
		1	3
Равномерный	1	32,513 %	55,089 %
Равномерный	2	86,691 %	100 %
Равномерный	3	79,742 %	80,166 %



С использованием предложенного алгоритма оценки качества системы наблюдения можно поставить обратную задачу обоснования структуры наблюдательной сети, а именно взаимного расположения источников выбросов и постов наблюдения. Целью такой задачи может быть максимизация вероятности обнаружения нарушения любым источником загрязнения.

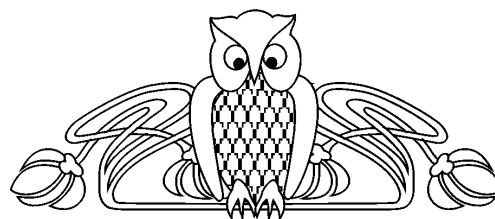
Выводы, которые можно сделать из результатов имитационного моделирования, показывают возможность определения источников залповых выбросов. В ряде неблагоприятных случаев возможен пропуск события при существовании одной станции мониторинга, однако, наличие трех и более станций существенно уменьшает вероятность пропуска. Результаты имитационного моделирования создают основу для решения задачи обоснования структуры и параметров наблюдательной сети при заданных ограничениях (количество постов, вероятность обнаружения и т.д.)

### Библиографический список

1. Овчаренко А.В., Белозеров А.Б., Березина С.В., Зобнин Б.Б., Уткин В.И., Черванев В.О. Отчет о научно-исследовательской работе РФФИ – Урал № 04-01-95096 «Динамические модели загрязнения воздушной среды в городской агломерации Екатеринбург–Первоуральск, Ревда, Дегтярск, Арамилы, Кольцово, Березовский, Среднеуральск». Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2005. 51 с.
2. Овчаренко А.В., Белозеров А.Б., Березина С.В., Зобнин Б.Б., Уткин В.И., Черванев В.О. Методика создания динамической модели загрязнения воздушного бассейна Екатеринбурга // Геологическая интерпретация гравитационных, магнитных и электрических полей: Материалы 33 сессии Междунар. семинара им. Д.Г. Успенского. Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2006. С. 264–267.
3. Зобнин Б.Б., Черванев В.О. Модель наблюдения совокупности природного и техногенного процессов // Глубинное строение, геодинамика, мониторинг, интерпретация геофизических полей: Материалы 3 науч. чтений Ю.П. Булашевича. Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2005. С. 124–126.

УДК 533.6.011

## ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ДВУМЕРНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПУЛЬСИРУЮЩИХ ДЕТОНАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ



Г.П. Шиндяпин\*, С.П. Шевырев, В.А. Поршнева

Саратовский государственный университет,  
\*кафедра вычислительного эксперимента в механике,  
кафедра прикладной информатики  
E-mail: kpi@info.sgu.ru

В настоящей статье разрабатывается методика расчета параметров и характеристик пульсирующего детонационного двигателя с диффузором и эжектором на различных режимах и этапах его работы.

Ведется построение численных методов решения задачи по определению параметров течения продуктов детонации и воздуха в детонационном двигателе в различные моменты времени. Определяется суммарный импульс детонационного двигателя с диффузором и эжектором за один такт работы.

Проведены пробные расчеты для математической модели детонационного двигателя с диффузором и эжектором на различных этапах его работы.

**Research and Development of Bidimensional Mathematical Models of Pulsing Detonation Engines for Perspective Flying Devices**

G.P. Shindyapin, S.P. Shevirev, V.A. Porshnev

In the present paper the design procedure of parameters and performances of the pulsing detonation engine with a diffuser and the ejector on different conditions and stages of its operation develops. Construction of numerical methods of a solution of a commitment by definition parameters of flow of yields of a knocking and air to the detonation engine in different instants is carried on. Determining of a general pulse of the detonation engine with a diffuser and the ejector for one clock tick of operation.

Trial accounts of a mathematical model of the detonation engine with a diffuser and the ejector at different stages of his operation are conducted.

Детонационные двигатели привлекают внимание разработчиков практически всех видов транспорта своей высокой производительностью. Создаются различные модели таких двигателей [1]–[3].

В [3] был дан обзор состояния исследований в разработке детонационных двигателей, построена математическая модель импульсного детонационного двигателя в квазидвумерной постановке, приведены результаты расчета параметров течения продуктов детонации и воздуха в случае наличия диффузора.

В настоящей статье исследования продолжены на случай плоской и осевой симметрии. Также добавлен эжектор, функция которого – засасывать окружающий воздух. Сложная геометрия иссле-