

УДК 551.46.08

## АЛГОРИТМИЗАЦИЯ НАЧАЛЬНЫХ ЭТАПОВ ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ «ПРИРОДА-ТЕХНОГЕНИКА»

**Р. И. Сольницев,**

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

**М. А. Тревгода,**

аспирант

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

*Рассматривается начальный этап процесса проектирования замкнутой системы управления «Природа-техногеника». Приводится алгоритм моделирования работы системы управления с учетом влияния соседних источников загрязняющих веществ, метеорологических данных и трансграничного переноса.*

**Ключевые слова** — система управления, моделирование, алгоритм, загрязняющие вещества.

Актуальной экологической проблемой является проблема защиты окружающей среды от загрязняющих веществ (ЗВ), выбрасываемых промышленными предприятиями в атмосферу. Традиционные подходы к решению этой задачи основаны на использовании аппаратных систем с обязательным присутствием «человеческого фактора». Для соблюдения установленных нормативов выбросов вредных веществ в атмосферный воздух, их контроля и управления такими выбросами необходима замкнутая система управления.

В работах [1, 2] была предложена и в дальнейшем развита [3, 4] концепция замкнутой системы управления «Природа-техногеника» (ЗСУПТ), лишенной недостатков традиционных подходов. Основными преимуществами такой системы являются: гарантированность минимизации ЗВ в реальном времени, отсутствие влияния «человеческого фактора», формирование законов управления аппаратными средствами очистки от ЗВ в исполнительных устройствах в соответствии с экологическими критериями конкретного объекта управления.

Разработка такой сложной системы управления как ЗСУПТ невозможна без применения современных информационных технологий, в частности, без разработки САПР, обеспечивающей решение задач моделирования, расчета, синтеза управления, конструкторского проектирования.

Для создания эффективной САПР замкнутой системы управления необходима разработка многих подсистем: конструкторского проектирования, обработки результатов экспериментальных исследований, технологической подготовки, подготовки технической документации и в том числе рассматриваемой в данной работе подсистемы моделирования и расчета, применяемой на начальных этапах проектирования. Создание такой подсистемы требует алгоритмизации ряда проектных процедур, в том числе по разработке средств моделирования и расчета распространения ЗВ в условиях непрерывно изменяющихся параметров атмосферы и режимов источников ЗВ (ИЗВ) с дальнейшей реализацией таких алгоритмов в соответствующих пакетах прикладных программ.

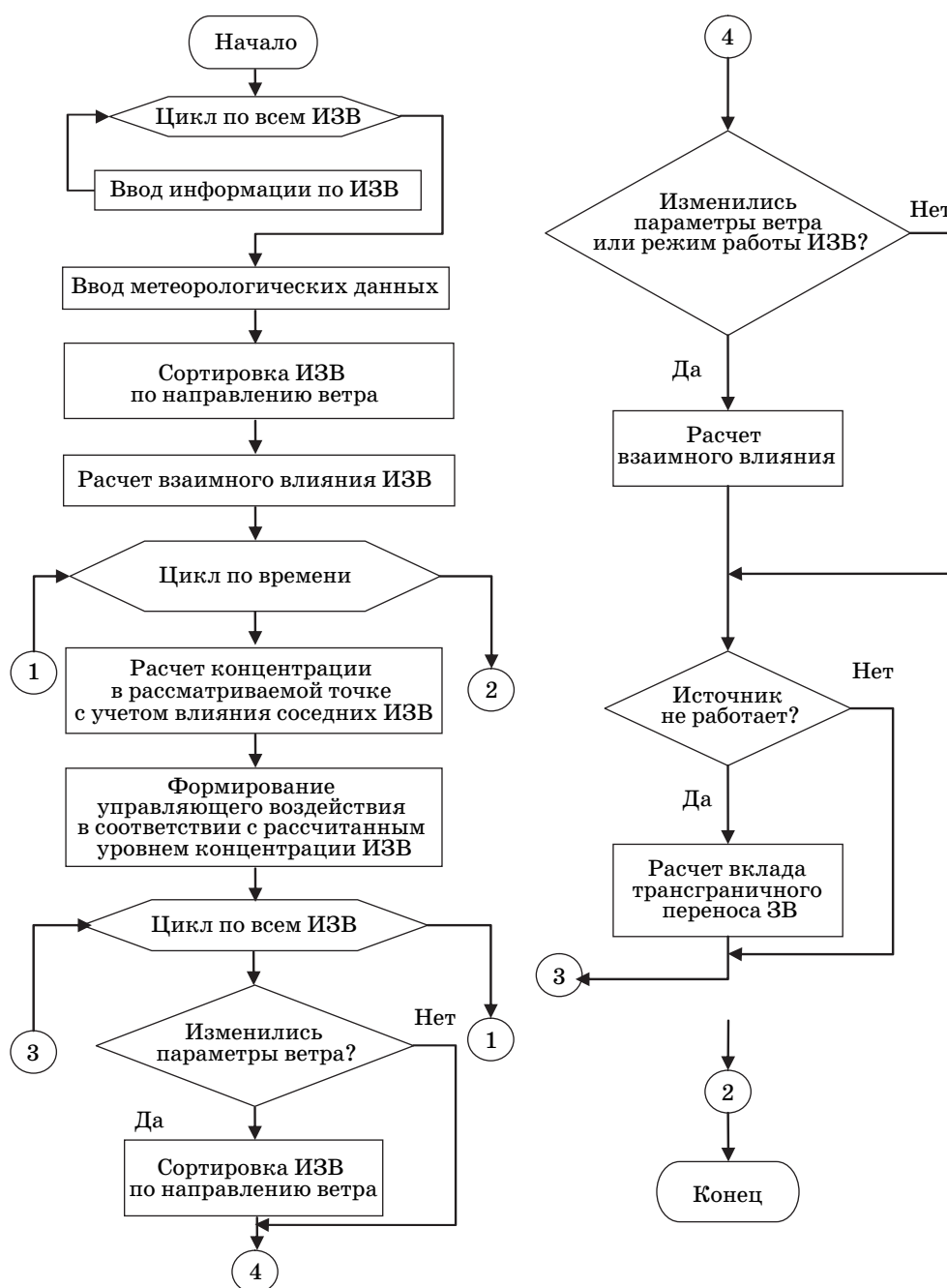
Проведенный анализ существующих моделей распространения ЗВ в пространстве [5] выявил их ограничения при проектировании ЗСУПТ выбросами ЗВ. Так, эмпирико-статистические модели, вследствие их прогностического характера, могут использоваться только как вспомогательные или для оценки перемещений ЗВ и степени загрязнения значительных пространств.

Существующие унифицированные программы расчета загрязнения атмосферы «Призма», «Эра», «Эколог» [6] предназначены лишь для последующего анализа результатов мониторинга и не могут быть использованы в САПР ЗСУПТ, поскольку они не позволяют:

- моделировать и производить расчеты ЗСУПТ как системы автоматического управления;
- определять взаимное влияние загрязнений источников ЗВ в (микрорайоне, промышленной зоне) в динамике;
- рассчитывать влияние загрязнений, не находящихся в рассматриваемом микрорайоне источников загрязнений, — «трансграничных переносов»;
- рассчитывать поля концентраций (выбросов) непрерывно в процессе проектирования ЗСУПТ.

При проектировании ЗСУПТ необходимо учитывать влияние выбросов ЗВ от «соседних» источников в рассматриваемом микрорайоне (промышленная зона, поселок, район города), учитывать выпадение сухого и мокрого осадков, а также определять влияние трансграничного переноса ЗВ.

В развитие полученных результатов [3, 4] предлагается алгоритм учета взаимного влияния ИЗВ в ЗСУПТ. Блок-схема алгоритма (рис. 1) включает в себя следующие блоки:



■ Рис. 1. Алгоритм учета взаимного влияния ИЗВ

1) блок ввода параметров ИЗВ — осуществляет ввод следующих параметров: координат расположения источников, мощности выбросов, режима работы ИЗВ;

2) блок ввода метеорологических и синоптических параметров — осуществляет ввод этих параметров;

3) блок расчета взаимного влияния — определяет суммарное значение концентрации ЗВ от ИЗВ рассматриваемого микрорайона, зафиксированное датчиком отдельного ИЗВ;

4) блок сортировки источников загрязнения — определяет проекции координат местоположения источников ЗВ в подветренной области на ось, совпадающую с направлением ветра, и затем сортирует источники по возрастанию модулей проекций в системе координат, связанной с граничной точкой микрорайона;

5) блок учета нестационарности работы источников по времени — определяет время выполнения пересчета параметров распространения ЗВ в зависимости от изменений режимов работы ИЗВ и изменений метеорологических параметров.

Работа описанных блоков выполняется в замкнутом цикле.

Влияние соседних источников на величину концентрации  $i$ -го точечного источника ЗВ рассчитывается с помощью формулы, предложенной и обоснованной в работе [3]:

$$\frac{Q_i^*(L_{ij}, p)}{C_j(\xi, \eta, \zeta, p)} = \frac{K_1^*}{V_{ij}} \left[ 1 - e^{-\frac{(p+K_2^*)L_{ij}}{V_{ij}}} \right], \quad (*)$$

где  $Q_i$  — вносимая в  $i$ -й датчик составляющая ЗВ  $j$ -го источника;  $L_{ij}$  — расстояние между  $i$ -м и  $j$ -м источниками;  $p$  — оператор Лапласа;  $C_j$  — выброс (концентрация) ЗВ  $j$ -го источника, измеренная в точке максимума;  $\xi, \eta, \zeta$  — декартовы координаты;  $K_1^*$  — коэффициент передачи между  $C_j$  и  $Q_i$ ;  $V_{ij}$  — составляющие вектора скорости ветра в проекции на ось  $L_{ij}$ , соединяющую источники ЗВ;  $K_2^*$  — коэффициент, рассчитываемый по метеорологическим данным.

Предположим, что мы измеряем концентрацию ЗВ в  $i$ -й точке на определенном расстоянии от  $j$ -го точечного источника ЗВ, тогда величина концентрации ЗВ в этой точке будет

$$C_{\Sigma i} = C_i + C_{pi} + C_{Ti},$$

где  $C_{\Sigma i}$  — измеренная датчиком концентрация ЗВ  $i$ -го источника;  $C_i$  — составляющая концентра-

ции ЗВ, обусловленная собственными выбросами  $i$ -го источника;  $C_{pi}$  — составляющая концентрации ЗВ от соседних источников в рассматриваемом микрорайоне:  $C_{pi} = \sum_{j=1, i \neq j}^n C_j$ ;  $C_{Ti}$  — состав-

ляющая концентрации ЗВ выбросов, обусловленная трансграничным переносом. Под трансграничным переносом понимается совокупность всех потоков определенного ЗВ в исследуемом районе, помимо потоков ЗВ, обусловленных источниками этого района.

Тогда, если  $i$ -й источник отключен, на величину концентрации ЗВ в заданной точке будут влиять только две составляющие:

$$C_{\Sigma i}^0 = C_{pi} + C_{Ti},$$

где  $C_{\Sigma i}^0$  — концентрация ЗВ в заданной точке при неработающем  $i$ -м источнике загрязнений.

Вклад в значение концентрации от соседних источников  $C_{pi}$  может быть определен на основе формулы (\*). Тогда значение трансграничного переноса для рассматриваемого источника может быть получено по формуле

$$C_{Ti} = C_{\Sigma i}^0 - C_{pi}.$$

Таким образом, определяя значение концентрации ЗВ, обусловленное трансграничным переносом для разных ИЗВ в микрорайоне, в соответствии с режимами работы этих ИЗВ, в конечном счете, можно получить более точное усредненное значение  $C_T$  для всего микрорайона.

Измерение и расчет концентрации ЗВ  $C_p$  и  $C_T$  позволяют определять концентрацию ЗВ от  $i$ -го источника ЗВ и управлять ею в ЗСУПТ.

Взаимодействие  $n$  ИЗВ в ограниченном районе (промышленная зона, микрорайон мегаполиса) представляется матрицей

$$[C_{ij}]^{n+1, n+1} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & \dots & C_{1n} & C_{1n+1} \\ C_{21} & C_{22} & \dots & C_{2n} & C_{2n+1} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ C_{n1} & C_{n2} & \dots & C_{nn} & C_{nn+1} \\ 0 & 0 & \dots & 0 & C_{n+1, n+1} \end{pmatrix},$$

где при  $i = j$   $C_{ij}$  — собственная концентрация  $i$ -го источника ЗВ, измеренная его датчиком; при  $i \neq j$   $C_{ij}$  представляют концентрации взаимного влияния;  $C_{1n+1}, C_{2n+1}, C_{3n+1}, C_{n+1, n+1}$  — концентрации, обусловленные трансграничным переносом ЗВ.

На основе данной матрицы определяются следующие характеристики:

$$1) \max_{i=1}^n \left\{ \sum_{j=1, j \neq i}^n C_{ij} \right\} \text{ — значение максимальной}$$

концентрации влияния соседних источников в микрорайоне;

$$2) \max_{i=1}^n \left\{ \sum_{j=1}^{n+1} C_{ij} - \sum_{i=1, i \neq j}^n C_{ij} \right\} \text{ — значение концен-}$$

трации самого «грязного» источника;

$$3) \max_{i \neq j, j=1, i=1}^n \{C_{ij}\} \text{ — максимальное значение}$$

концентрации влияния  $i$ -х источников ЗВ;

$$4) \max_{j=1}^n \left\{ \sum_{i \neq j, i=1}^n C_{ij} \right\} \text{ — максимальное значение}$$

концентрации суммарного влияния ИЗВ на  $i$ -е источники;

$$5) C_{\text{измерен}} - \left\{ \sum_{i=1, i \neq j}^n C_{ij} \right\} \text{ — концентрация ЗВ,}$$

обусловленная трансграничным переносом ЗВ.

Особенность предложенного алгоритма состоит в том, что на каждом шаге моделирования ЗСУПТ, помимо расчета параметров моделей ЗСУПТ, выполняется проверка необходимости пересчета параметров взаимного влияния ИЗВ в соответствии с режимами работы источников и изменением метеорологических параметров, и если такая необходимость возникает, происходит необходимый расчет. Таким образом, в процессе моделирования с учетом алгоритма измерений учитывается взаимное влияние источников загрязнения  $C_p$  и вычисляется величина трансграничного переноса  $C_T$  при изменении указанных выше параметров.

Данный алгоритм должен работать в определенные промежутки времени, и мы рассмотрим последовательность выполнения расчетов по алгоритму, представленному на рис. 1, во времени.

Предполагается, что все источники загрязнений являются точечными и их режим работы регламентирован в соответствии с результатами инвентаризации ИЗВ [7]. Тогда алгоритм измерений и мониторинга в районе ИЗВ можно представить следующей последовательностью операций:

1)  $i$ -й ИЗВ отключен,  $C_i = 0$ ,  $C_{i\Sigma}^0 = C_{ip} + C_{iT}$ ,  $i = 1, n$ , поскольку  $C_{i\Sigma}^0 = C_i + C_{ip} + C_{iT}$ ;

2)  $i$ -й ИЗВ отключен, осуществляется выставка «0» датчика  $\Delta_i$ ,  $C_{i\Sigma}^0 = 0$ ;

3)  $i$ -й ИЗВ включен, осуществляется измерение  $C_i$  в факеле при работающем производстве  $C_i(t)$ ,  $t_k < t_c < t_{k+1}$ ,  $i = 1, n$ ,  $k = 0, m$ ;

4)  $i$ -й ИЗВ включен, включается (замыкается) ЗСУПТ, осуществляется минимизация  $C_i(t) \Rightarrow \min_{t_k < t < t_{k+1}} \{C_i(t)\}$ ,  $k = 0, m$ ,  $i = 1, M$ ;

5)  $i$ -й ИЗВ отключен (см. п. 1), расчетная величина

$$C_{ip} \cong \overline{C_{ip}}, \overline{C_{ip}} = \sum_{j=1, j \neq i}^n C_{j\Sigma} \frac{K_1^*}{V_{ij}} \left( 1 - e^{-\frac{(p+K_{2j}^*)L_{ij}}{V_{ij}}} \right), \text{ тог-}$$

да  $C_{iT} = C_{i\Sigma}^0 - \overline{C_{ip}}$ ,  $i = 1, n$ .

Усредненная оценка величины концентрации ЗВ на промежутке времени при  $0 < t < T$ ,  $(t_{k+1} - t_k) \in T$ ,  $k = 1, N$ , обусловленной трансграничным переносом, определяется как

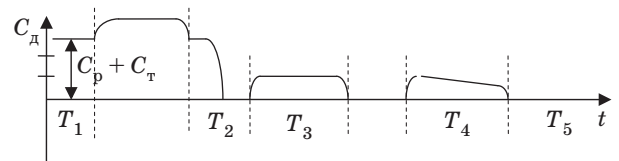
$$(\overline{C_T}) = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n \frac{1}{t_{k+1} - t_k} \int_{t_k}^{t_{k+1}} C_{iT}(t) dt \right);$$

6) поскольку  $C_i(t)$ ,  $C_{ip}(t)$ ,  $C_{iT}(t)$  — случайные процессы, то в дальнейшем оценки по пп. 1–5 должны носить статистический характер, т. е. должны вычисляться соответствующие им характеристики случайных процессов, например математические ожидания дисперсии, корреляционные функции.

Проиллюстрируем диаграмму работы алгоритма измерений и мониторинга на модельном примере. Пусть заданы уровни концентрации ЗВ  $C_T$  и  $C_p$ , промежутки времени работы  $i$ -го ИЗВ. Тогда работу алгоритма можно отобразить на временной диаграмме (рис. 2), где  $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5$  — промежутки времени, соответствующие операциям алгоритма, описанным ранее;  $C_p$  — рассчитываемая концентрация влияния  $i$ -х источников;  $C_d$  — концентрация ЗВ, фиксированная на датчике ИЗВ;  $C_T$  — рассчитываемое значение концентрации ЗВ от трансграничного переноса ЗВ.

На диаграмме показано, что расчет концентраций  $C_T$  и  $C_p$  производится при неработающем ИЗВ, эти значения используются для «обнуления» датчика. Из диаграммы видно изменение концентрации ЗВ на датчике до «обнуления» — промежуток времени  $T_1, T_2$ , после учета  $C_T$  и  $C_p$  — промежуток времени  $T_3$ , и в процессе работающей ЗСУПТ — промежуток времени  $T_4$ . В промежуток времени  $T_5$  происходит расчет концентраций  $C_T$  и  $C_p$ .

Предложенный алгоритм составляет основу подсистемы моделирования и расчета САПР ЗСУПТ, которая позволит моделировать работу ЗСУПТ с учетом метеорологических данных, трансграничного переноса, влияния соседних ИЗВ.



■ Рис. 2. Временная диаграмма работы алгоритма учета взаимного влияния ИЗВ

## Литература

1. Худoley В. В., Ливанов Г. А. Проблемы загрязнения окружающей среды стойкими органическими соединениями, в частности диоксинами // Тр. Междунар. конф. IENS'04 / Под ред. проф. Р. И. Сольничева / ГУАП. СПб., 2004. С. 39–43.
2. Сольничев Р. И. Построение замкнутых систем «Природа-техногеника» // Открытое образование / Информационные технологии в науке, образовании (IT+S&E'06): Материалы XXXIII Междунар. конф., Украина, Ялта—Гурзуф, 2006. С. 404–408.
3. Сольничев Р. И. Вопросы построения замкнутой системы управления «Природа-техногеника» // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2009. № 7. С. 23–32.
4. Сольничев Р. И., Коршунов Г. И., Шабалов А. А. Моделирование замкнутой системы управления «Природа — техногеника» // Информационно-управляющие системы. 2008. № 2. С. 36–41.
5. Обзор рынка экологических программных продуктов. <http://www.ektor.ru/pages/norm.asp?id=14> (дата обращения: 25.01.2010).
6. Квашнин И. М. Промышленные выбросы в атмосферу. Инженерные расчеты и инвентаризация. — М.: Авок-пресс, 2005. — 394 с.
7. Шабалов А. А. Сравнительный анализ и требования к математическим моделям распространения промышленных выбросов в атмосфере // Приборостроение в экологии и безопасности человека (ПЭБЧ'07): Тр. Пятой Междунар. конф. / Под ред. проф. Р. И. Сольничева / ГУАП. СПб., 2007. С. 265–270.

## УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

При подготовке рукописей статей редакция просит Вас руководствоваться следующими рекомендациями.

Объем статьи (текст, таблицы, иллюстрации и библиография) не должен превышать эквивалента в 16 страниц, напечатанных на бумаге формата А4 на одной стороне через 1,5 интервала в Word шрифтом Times New Roman размером 13.

Обязательными элементами оформления статьи являются: индекс УДК, инициалы и фамилия автора (авторов), ученая степень, звание, полное название организации; заглавие, аннотация (5–7 строк) и ключевые слова на русском и английском языках, подписанные подписи.

**Формулы** набирайте в Word, при необходимости можно использовать формульный редактор; для набора одной формулы не используйте два редактора; при наборе формул в формульном редакторе знаки препинания, ограничивающие формулу, набирайте вместе с формулой; для установки размера шрифта никогда не пользуйтесь вкладкой Other..., используйте вкладку Define; в формулах не отделяйте пробелами знаки: + = -.

При наборе символов в тексте помните, что символы, обозначаемые латинскими буквами, набираются светлым курсивом, русскими и греческими — светлым прямым, векторы и матрицы — прямым полужирным шрифтом.

**Иллюстрации** в текст не заверстываются и предоставляются отдельными исходными файлами, поддающимися редактированию:

— рисунки, графики, диаграммы, блок-схемы изготавливаются в векторных программах: Visio 4, 5, 2002–2003 (\*.vsd); Coreldraw (\*.cdr); Excel; Word; Adobellustrator; AutoCad (\*.dxf); Компас; Matlab (экспорт в формат \*.ai);  
— фото и растровые — в формате \*.tif, \*.png с максимальным разрешением (не менее 300 pixels/inch).

**В редакцию предоставляются:**

— сведения об авторе (фамилия, имя, отчество, место работы, должность, ученое звание, учебное заведение и год его окончания, ученая степень и год защиты диссертации, область научных интересов, количество научных публикаций, домашний и служебный адреса и телефоны, факс, e-mail), фото авторов: анфас, в темной одежде на белом фоне, должны быть видны плечи и грудь, высокая степень четкости изображения без теней и отблесков на лице, фото можно представить в электронном виде в формате \*.tif, \*.png с максимальным разрешением — не менее 300 pixels/inch при минимальном размере фото 40 × 55 мм;  
— экспертное заключение.

**Список литературы** составляется по порядку ссылок в тексте и оформляется следующим образом:

— для книг и сборников — фамилия и инициалы авторов, полное название книги (сборника), город, издательство, год, общее количество страниц;  
— для журнальных статей — фамилия и инициалы авторов, полное название статьи, название журнала, год издания, номер журнала, номера страниц;  
— ссылки на иностранную литературу следует давать на языке оригинала без сокращений;  
— при использовании web-материалов указывайте адрес сайта и дату обращения.

Более подробную информацию см. на сайте: [www.i-us.ru](http://www.i-us.ru)