УДК 551.46.08

Р.И.СОЛЬНИЦЕВ, *д-р техн. наук, профессор, remira70@mail.ru*
Г.И.КОРШУНОВ, *д-р техн. наук, профессор, kgi@pantesl.ru*
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

R.I.SOLNITSEV, *Dr. in eng. sc., professor, remira70@mail.ru*
G.I.KORSHUNOV, *Dr. in eng. sc., professor, kgi@pantesl.ru*
Saint Petersburg State university of aerospace instrumentation

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СНИЖЕНИЕМ СОДЕРЖАНИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРЕ

Рассмотрен принципиально новый подход к управлению процессом снижения загрязняющих веществ в атмосфере, заключающийся в построении системы автоматического управления (САУ). Объект управления представляется математической моделью вход-выход. Приведены теоретические и практические результаты создания такой САУ.

***Ключевые слова*:** экология, загрязняющие вещества, система автоматического управления, функция переноса, уравнение конвекции-диффузии, дифференциальные уравнения.

THE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR AIR POLLUTION DECREASE

The principal new approach for the air pollutions control in form of automatic control system (ACS) is considered. The object of control is represented by the mathematical model input-output. The theoretical and practical results of the ACS creation are cited.

***Key words*:** ecology, pollutants, automatic control system, transfer function, convection-diffusion equation, differential equations.

Задача автоматического управления в области минимизации содержания загрязняющих веществ (ЗВ) в атмосфере обычно решается созданием локальных систем автоматического регулирования (САР). Такие САР выполняют параметрическое регулирование выбросами ЗВ на основе измерений внутри и на выходе источника ЗВ. Локальные САР не обеспечивают адекватного управления содержанием ЗВ, так как не отслеживают значения концентраций ЗВ в наиболее опасных для населения точках максимума, находящихся на значительных расстояниях от источника ЗВ.

В настоящее время решение задачи минимизации ЗВ в атмосфере осуществляется средствами мониторинга, подготовкой на его основе и принятием организационно-технических решений. Эффективность таких мероприятий недостаточна из-за недостоверности данных мониторинга, невозможности управления в реальном режиме времени, разомкнутости системы управления природа – техногеника (СУПТ), включения «человеческого фактора» в разрыв между процессами мониторинга и очистки, недостаточным качеством и отсутствием управляемых очистных агрегатов.

Предложенный в работе [6] и развитый в дальнейшем [7, 8] класс систем автоматического управления (САУ) в виде замкнутых систем управления природа – техногеника (ЗСУПТ) позволяет устранить недостатки локальных САР и направлен на решение широкого круга следующих задач:

• минимизация «человеческого фактора»;

• управление нейтрализацией загрязняющих веществ (ЗВ) от источников по дистанционным измерениям в режиме реального времени;

• определение максимальных значений ЗВ в экстремальных точках факела;

• управление многомерным объектом с взаимной компенсацией ЗВ.

Создание такой САУ включает следующие этапы:

• построение математической модели объекта управления;

• идентификация математической модели по известным априорным и апостериорным данным;

• синтез законов управления исполнительными элементами;

• формирование структуры САУ, выбор и расчет ее звеньев;

• моделирование ЗСУПТ как САУ при вариации параметров и возмущений;

• проектирование, изготовление и испытания аппаратно-программных средств и элементов;

• проектирование уникальных элементов – газовых сенсоров и газоочистных агрегатов на основе нанотехнологий;

• коммерциализация и серийное производство.

При построении математических моделей объекта управления (ОУ) были проанализированы известные модели распространения ЗВ, отличающиеся по разным классификационным признакам: по масштабу (от глобальных атмосферных межконтинентальных и трансграничных переносов до региональных и до уровня предприятия); по числу учитываемых факторов (метеорологических, синоптических, наличия многих источников и т.д.) и физических процессов (диффузии, конвекции, диссипации и т.д.). Основным отличием предложенных моделей является их направленность на использование в САУ и приведение модели газовоздушной среды к виду вход – выход, пригодному для построения САУ. В ЗСУПТ математическая модель ОУ, выведенная из классического уравнения конвекционного переноса массы ЗВ, представлена в виде

$$\frac{\partial C}{\partial t}+V_x\frac{\partial C}{\partial x}+V_y\frac{\partial C}{\partial y}+V_z\frac{\partial C}{\partial z} = K_1Q-K_2C,$$

где $C(x,y,z,t)$ – концентрация (масса) ЗВ; V_x, V_y, V_z – проекции скорости переноса (ветра) в декартовой системе координат x, y, z; $Q(x,y,z,t)$ – возмущающее воздействие на предприятие – источник ЗВ (топливо, сырье, продукция); K_1 – коэффициент пропорциональности; K_2 – коэффициент преобразования, учитывающий осадки, выпадения, химические преобразования и эффективность пылегазоуловителей (ПГУ).

В [8] выведена зависимость

$$\frac{C(L,y,z,p)}{Q(x_0,y,z,p)} = \frac{K_1}{V_x}\times$$

$$\times\left(1-\exp\left[-\frac{(p+k_2)(L-x_0)}{V_x}\right]\right), \qquad (1)$$

связывающая «выход» ЗВ ($x=L$), со «входом» ($x=x_0$).

Измерение ЗВ производится газоанализаторами бортового исполнения в точках $\max\{C_j\}$. Подвижные носители управляются по законам поиска экстремума с помощью последовательного применения, сначала беспилотных летательных аппаратов для предварительной оценки координат точки экстремума в факеле, затем – управляемых аэростатов (зондов) для «подвешивания» и уточнения координат сенсоров ЗВ в этих точках.

Для расстояний, соответствующих району, промышленной зоне, формула (1) получена в предположении движения массы ЗВ только по оси x.

Для определения траекторий движения массы ЗВ, точек экстремума, запаздываний при измерении необходимо получить зависимости $C(x,y,z,t)$ в пространстве координат и времени, а в общем случае – с учетом параметров источника ЗВ, факела, синоптических данных.

В соответствии с теоремой о характеристиках дифференциальных уравнений [4] в частных производных первого порядка, полагая $x-x_0=L$, $y-y_0=R$, $z-z_0=H$, где L, R, H – координаты точек измерения ЗВ, для координаты x найдем

$$C(p,x,y,z) = S_{0x}\exp\left[-\frac{(K_2+p)(x-x_0)}{V_x}\right]\times$$

$$\times[C_0(p)(K_2+p)+K_1Q_0(p)].$$

Полагая $x - x_0 = L$, получим уравнения для определения проекции траектории движения ЗВ на плоскость y, z:

$$C(p,L,x_0,y,z) = S_{0x}\exp\left[-\frac{(K_2+p)L}{V_x}\right]\times$$

$$\times[C_0(p)(K_2+p)+K_1Q_0(p)],$$

а также передаточную функцию, аналогичную (1). Так же образом определяются проекции траектории на плоскости x,y и x,z и соответствующие передаточные функции.

Приведенные математические модели, в отличие от известных, позволяют более точно определять параметры точек измерения ЗВ. Построенные на их основе алгоритмы обеспечивают в режиме реального времени определение концентраций ЗВ и последующее управление газоочисткой.

Управление нейтрализацией ЗВ в промышленной зоне может быть построено на известных соотношениях [5] между концентрациями кислотных и щелочных составляющих в атмосфере ($C_{р}^{к} + C_{вн}^{к} + C_{ф}^{к} - C_{р}^{щ} - C_{вн}^{щ} - C_{ф}^{щ}) \geq \Delta C$, где индексы: к и щ соответствуют кислотной и щелочной составляющей, р – региону, вн – внешним факторам, ф – фону.

Посредством ЗСУПТ можно управлять $C_{р}^{к}$ и $C_{р}^{щ}$, меняя эффективность очистных агрегатов так, чтобы обеспечивать выполнение критерия $|\Delta C| \leq ПДК$. Например, согласно реакции $H_2SO_4 + CaO = CaSO_4 + H_2O$ для нейтрализации 1 г SO_2 необходимо 0,875 г CaO или 0,625 г MgO. В выбросах предприятий, работающих на угле (мазуте), содержатся CaO и MgO, которые могут нейтрализовать оксиды серы.

Техническая реализация ЗСУПТ достигается созданием аппаратно-программных комплексов, применимых для минимизации атмосферных ЗВ разного типа. Структура ЗСУПТ включает измерительные, усилительно-преобразующие, вычислительные, регистрирующие и исполнительные устройства [3].

Измерительные устройства включают широкий спектр датчиков-газоанализаторов, построенных на основе полупроводниковых наносенсоров с высокой чувствительностью (например, от 10-3 мг/м^3 по сернистому ангидриду) с относительной погрешностью определения ±15 % [1], измеряющих и передающих информацию о концентрациях ЗВ. Измерительные устройства размещаются в точках с наибольшей концентрацией ЗВ с помощью подвижных носителей (малогабаритных беспилотных летательных аппаратов, аэростатов с установленной аппаратурой мониторинга концентраций ЗВ).

Усилительно-преобразующие, вычислительные устройства обеспечивают обработку, сжатие, формирование информации и передачу ее в управляющие и регулирующие устройства, а также в устройства визуализации и регистрации.

Исполнительные устройства – очистные агрегаты – получают сигналы управления в соответствии с заданным законом (алгоритмом) управления и изменяют свои параметры с целью (по критерию) минимизации управляемых составляющих ЗВ. Исполнительные устройства регулируют параметры очистных агрегатов в соответствии с управлением, минимизирующим концентрации ЗВ по критерию предельно допустимых концентраций (ПДК) или аналогичных критериев. В результате синтеза управлений для одномерного случая получены управления в форме ПИД-регуляторов, инвариантные по отношению к основной продукции предприятия.

Результаты построения модели ЗСУПТ для одного источника были обобщены на многомерный случай [9]. Для этого принято, что в системе координат, связанной с землей, расположены N источников ЗВ (город, промышленная зона, поселок). Промзона или район с предприятиями – источниками ЗВ (ИЗВ) находятся внутри границы контура, на который воздействует внешняя среда. Общепринятое понятие трансграничный перенос в этом случае представляется возму-

щающим воздействием на предприятия-ИЗВ. На рисунке показана функциональная схема взаимодействия предприятий-ИЗВ, расположенных внутри границы. Внешняя среда оказывает однонаправленное воздействие на промзону.

Влияние соседних источников на величину концентрации i-го точечного источника ЗВ рассчитывается с помощью формулы, предложенной и обоснованной в [4]:

$$\frac{Q_i^*(L_{ij},p)}{C_j(x_j,y_j,z_j,p)}=\frac{K^*_1}{V_{ij}}\left(1-\exp\left[-\frac{(p+K^*_2)L_{ij}}{V_{ij}}\right]\right), \quad (2)$$

где V_{ij} – составляющие вектора скорости ветра в проекции на ось L_{ij}, соединяющую источники ЗВ; Q_i – вносимая в i-й датчик составляющая ЗВ j-го источника; C_j – выброс (концентрация) ЗВ j-го источника, измеренная в точке максимума; p – оператор Лапласа; K_1^* – коэффициент передачи между C_j и Q_i; L_{ij} – расстояние между i-м и j-м источниками; K_2^* – коэффициент, рассчитываемый по метеорологическим данным; ξ, η, ζ – декартовы координаты. Расчет концентрации ЗВ для приземного слоя при известной концентрации в экстремальной точке производится по формуле, аналогичной (2).

Величина концентрации ЗВ в точке складывается из следующих составляющих:

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

где $C\sum i$ – измеренная датчиком концентрация ЗВ i-го источника; C_i – составляющая концентрации 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} – составляющая 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.

Если i-й ИЗВ отключен, на величину концентрации ЗВ в i-й точке будут влиять только две составляющие:

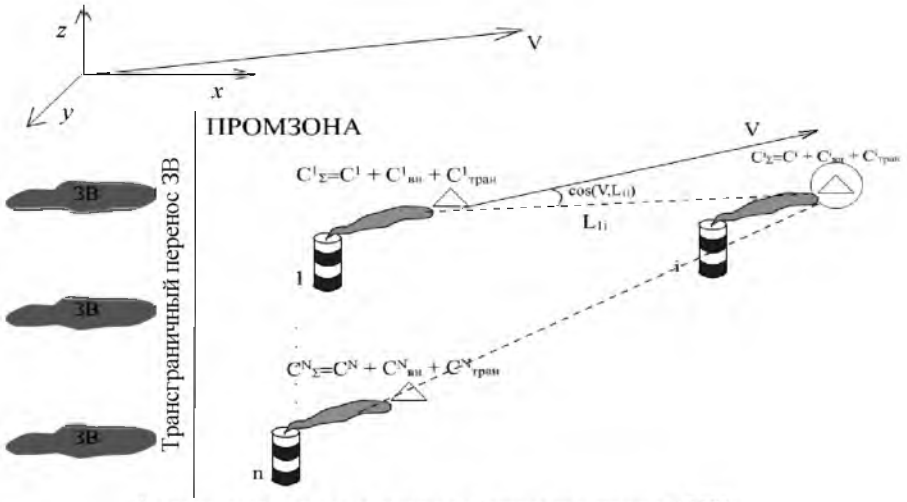
$$C^0{}_{\Sigma i}=C_{pi}+C_{Ti},$$

где $C^0_{\Sigma i}$ – концентрация ЗВ в i-й точке при неработающем i-м источнике загрязнений.

Вклад в значение концентрации от соседних источников C_{pi} – может быть определен на основе формулы (2). Тогда значение трансграничного переноса для рассматриваемого источника может быть получено по формуле

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

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 $C_т$ для всего микрорайона.



Функциональная схема взаимодействия предприятий-ИЗВ

Измерение и расчет концентрации ЗВ $C_р$ и $C_т$ позволяют определять концентрацию ЗВ от *i*-го источника ЗВ и управлять ею в ЗСУПТ.

Концепция ЗСУПТ «Природа – техногеника» предусматривает создание технологий управляемой газоочистки. Необходимые для этого технические средства включают как собственно реагенты, в которых происходят процессы поглощения и нейтрализации загрязняющих веществ (ЗВ), так и регуляторы этих процессов [1].

Вопросы коммерциализации ЗСУПТ сложно решаются по обычной рыночной схеме. Это связано с отсутствием механизма перечисления сэкономленных от внедрения природоохранных мероприятий средств исполнителю. Расчет экономического эффекта, необходимый для коммерциализации ИП ЗСУПТ, выполняется по концепции предотвращенного ущерба, в частности в соответствии с методикой, разработанной для Москвы. Предварительные расчеты показывают, что издержки по эксплуатации ЗСУПТ не превышают 10 % от реальных затрат на проектирование, изготовление и внедрение ЗСУПТ на конкретном предприятии-ИЗВ. Другой путь коммерциализации инновационного проекта ЗСУПТ определяется заинтересованностью стран Европейского союза, в первую очередь Финляндии и Норвегии, в решении проблем трансграничного переноса ЗВ. Внедрение ЗСУПТ создаст необходимые условия для процесса минимизации трансграничных ЗВ, другими условиями являются обмен достоверной информацией между странами, гармонизация нормативной базы и стандартов, координация мероприятий по модернизации производств [2, 3].

В процессе выполнения работ по ЗСУПТ проведены научные исследования, модельные и натурные эксперименты, получены, апробированы и оформлены необходимые результаты для внедрения ЗСУПТ на промышленных предприятиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Иванов Д.В.* Инновационная технология управляемой газоочистки выбросов промышленных предприятий / Д.В.Иванов, Г.И.Коршунов, О.В.Черемисина, С.З.Эль-Салим // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского политехн. ун-та. 2009. № 5 (87).

2. *Коршунов Г.И.* Проблемы инвестирования в инновационный проект «Замкнутая система управления «Природа-техногеника» / Г.И.Коршунов, Р.И.Сольницев // Национальные приоритеты развития России: образование, наука, инновации: Тезисы. М., 2009.

3. *Коршунов Г.И.* Создание замкнутых систем управления «природа – техногеника» (методология и аппаратно-программные комплексы) / Г.И.Коршунов, Р.И.Сольницев // «Перспективы развития и стратегия партнерства цивилизаций»: Мат. к 4-му Цивилизационному форуму. Шанхай, 12-14 октября 2010 г. Ч.2. Международный конкурс инновационных проектов, ориентированных на партнерство государств и цивилизаций. М., 2010.

4. *Матвеев Н.М.* Методы интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений, М., 1963.

5. Мониторинг трансграничного переноса загрязняющих воздух веществ // Ю.А.Израэль, И.М.Назаров, Ш.Д.Фридман и др. Л, 1987. 303 с.

6. *Сольницев Р.И.* Минимизация человеческого фактора в системе «Природа-Техногеника» // Труды Межд. конф. IEHS'04 / Под ред. проф. Р.И.Сольницева, СПб, 2004.

7. *Сольницев Р.И.* Построение замкнутых систем «Природа-Техногеника» // Открытое образование: Мат. 33-й Межд. конф. «Информационные технологии в науке, образовании, Ялта-Гурзуф, 2006.

8. *Сольницев Р.И.* Вопросы построения замкнутой системы управления «Природа-техногеника» // Изв. Санкт-Петербургского электротехн. ун-та «ЛЭТИ», 2009. № 7.

9. *Сольницев Р.И.* Алгоритмизация начальных этапов процесса проектирования замкнутой системы управления «Природа-техногеника» / Р.И.Сольницев, М.А.Тревгода // Информационно-управляющие системы. 2010. № 2.

REFERENCES

1. *Ivanov D.V.* Innovation technology of the industrial enterprises gas pollutions controlled cleaning / D.V.Ivanov, G.I.Korshunov, O.V.Cheremisina. S.Z.El-Salim // The science-technical papers of Saint Petersburg Polytechnic University. 2009. N 5 (87).

2. *Korshunov G.I.* The invest problem in the innovation project «The closed control system «Nature-Technogenic» / G.I Korshunov, R.I.Solnitsev // The national priorities of Russia development: education, science, innovations: The thesises. Moscow, 2009.

3. *Korshunov G.I.* The closed control system «Nature-technogenic» creation (methodology, hardware and software) / G.I.Korshunov, R.I.Solnitsev // The development perspectives civilizations partnership strategy: Papers of the 4th Civilization forum. Shanghai, October 12-14, 2010. Part 2. The international concurs of the innovation projects oriented on states and civilizations partnership. Moscow, 2010.

4. *Matveev N.M.* The ordinary differential equations integration methods. Moscow, 1963.

5. The transboundary air pollutions monitoring / J.A.Israel, I.M.Nazarov, Sh.D.Fridman and a. o. Leningrad, 1987.

6. *Solnitsev R.I.* The human factor minimization in the «Nature-Technogenic» system // The international conference IEHS'04 proceedings, Saint Petersburg, 2004.

7. *Solnitsev R.I.* The closed control system «Nature-technogenic» creation // The open education: Proceedings 33th The intern. conf. The information technologies in science and education. Jalta-Gurzuf, 2006.

8. *Solnitsev R.I.* The problems of the closed control system «Nature-Technogenic» creation // Journal of Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI». 2009. N 7.

9. *Solnitsev R.I.* The primary process stages of the closed control system «Nature-technogenic» algorithmization / R.I.Solnitsev, M.A.Trevgoda // Information-control systems, 2010. N 2.