

Список литературы

1. Беляев Н. Н. Защита зданий от проникновения в них опасных веществ: Монография / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько, Н. В. Росточило. – Д.: «Акцент ПП», 2014. – 136 с.
2. Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы / М. Е. Берлянд. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 273 с.
3. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – К.: Наук. думка, 1997. – 368 с.
4. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Марчук Г. И. – М.: Наука, 1982. – 320 с.
5. Самарский А. А. Теория разностных схем / Самарский А. А. – М.: Наука, 1983. – 616 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Зберовським О.В.
Надійшла до редакції 22.01.15*

УДК 519.6

© Н.Н. Беляев, В.И. Ночвай

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ В РЕГИОНАЛЬНЫХ ЗАДАЧАХ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Предложен комплексный подход к созданию математической модели и ее численной реализации, позволяющий рассчитать динамику регионального и локального загрязнения атмосферного воздуха с учетом организованных и неорганизованных источников выбросов загрязняющих веществ вследствие хозяйственной деятельности и возможных чрезвычайных ситуаций.

Запропоновано комплексний підхід до створення математичної моделі та її чисельної реалізації, що дозволяє розрахувати динаміку регіонального і локального забруднення атмосферного повітря з урахуванням організованих і неорганізованих джерел викидів забруднюючих речовин внаслідок господарської діяльності та можливих надзвичайних ситуацій.

A comprehensive approach to the creation of a mathematical model and its numerical implementation, which allows to calculate the dynamics of regional and local air pollution taking into account organized and others sources of pollutant emissions due to economic activities and possible emergencies.

Вступление. В связи с ухудшением экологической обстановки, ослаблением государственного экологического контроля и практически неконтролируемом использовании природных ресурсов задачи обеспечения экологической безопасности являются приоритетными при построении моделей регионального развития. При этом актуальной задачей является разработка комплексных математических моделей процессов антропогенного влияния на окружающую среду и их численная реализация в региональном масштабе. От таких моделей требуется как расчет усредненных показателей

регионального качества окружающей среды, так и локальные расчеты опасных воздействий на экосистемы и здоровье жителей региона.

Постановка задачи. Рассматривается некоторый регион, в котором происходят процессы массообмена с атмосферой: испарение, осаждение, выветривание, биогенная и антропогенная эмиссия. Все источники будем представлять в виде n -точечных источников выбросов, l -линейных и m -площадных мгновенного, периодического, циклического и непрерывного (стационарные) действия. Организованные разделим по отраслевому признаку предприятий: промышленные, энергетические, сельскохозяйственные, горно-добывающие, а также отдельно следует выделить сектор домохозяйств и транспорт. Каждый источник выбрасывает $i=1..k$ – загрязняющих веществ. Количество и интенсивность неорганизованных источников зависят от регионального уровня экологической безопасности в промышленности, сельском хозяйстве и в бытовом секторе, а также террористических и военных угроз. Вероятность таких случаев можно оценить статистически либо на основании уровней безопасности действующих предприятий, транспортной и энергетической инфраструктуры. Следует также принимать во внимание тенденции изменения параметров надежности и безопасности за счет внутренних и внешних факторов (объем финансирования, природные факторы, политические и социальные риски). Актуальной задачей есть оценка общего уровня загрязнения региона, моделирование пространственно-временной динамики формирования полей концентраций загрязняющих веществ (ЗВ) с целью оценки экологических рисков опасных последствий загрязнений.

Анализ последних исследований и публикаций. В литературе известно большое количество публикаций посвященных моделированию загрязнения воздуха. В Советском Союзе известна теоретическая школа академика Г. И. Марчука, исследования и прикладные модели Н. Л. Бызовой, М. Е. Берлянда. В Европейском Союзе и США разработано ряд численных моделей расчета загрязнения воздуха: UAM-V, CMAQ, CAMx, ENVIRO-NIRLAM, CHIMERE [1]. Несмотря на это, применение таких моделей ограничено большой сложностью и узким классом задач: региональный перенос, локальный перенос, городская среда, ровная поверхность и прочее. Заметим, что применение базы моделей требует также довольно глубоких знаний особенностей реализации каждой из моделей, решаемых задач и сценариев. Не всегда возможным есть обеспечение интероперабельности и интеграции разнотипных моделирующих систем. Именно этим можно объяснить факт, что в Украине, для прогноза последствий аварий на химически - опасных объектах традиционно используются нормативная методика или методика РД 52.04.253-90. Обе методики основаны на применении эмпирических формул. Недостатком данных методик является отсутствие прямого учета скорости ветра, атмосферной диффузии на процесс формирования зоны загрязнения. В Украине также применяются аналитические модели и в частности модель Гаусса для прогноза аварийного загрязнения атмосферы. Эти модели позволяют оперативно рассчитать зону

загрязнения, но для упрощенных ситуаций типа точечный постоянно действующий источник выброса или точечный мгновенный выброс. Кроме этого, при применении моделей Гаусса необходимо научное обоснование значений коэффициентов дисперсии для территории Украины, которое в настоящее время – отсутствует. Для практики важно иметь гибкие математические модели, которые позволяли бы прогнозировать зону химического загрязнения с максимальным учетом физических факторов, влияющих на процесс переноса и позволяющих оценивать риски токсичного поражения людей и экосистем. Такие модели получили название «diagnostic models» [2,3].

В таких условиях для комплексного подхода к моделированию задач обеспечения региональной экологической безопасности возникает необходимость применения комплексной численной модели, которая использует базовую математическую модель переноса и ряд дополнительных моделей физико-химических процессов формирования выбросов и их трансформации для различных сценариев образования, распространения, нейтрализации и экологической ассимиляции ЗВ. Необходим также единый подход к численной аппроксимации уравнений, который позволяет задавать оптимальный шаг сетки на разных подсеточных уровнях с учетом физической параметризации и вычислительной эффективности.

Математическая модель накопления загрязнений в регионе.

Масштаб моделей с одной стороны должен охватывать весь регион Σ_0 , с другой стороны в задачах экологической безопасности необходимо производить также более детализированные расчеты локальной области воздействия загрязнений на населенные пункты и экосистемы. Как известно, в зависимости от цели и задач моделирования, методика решения таких задач должна отвечать определенным требованиям: разрешение модели, скорость расчета, учет основных физических и фото-химических параметров процесса, возможность моделирования различных сценариев (залповый выброс, полунепрерывный и т.д.).

Общую динамику накопления загрязнений (S) в задачах регионального экологического управления, как правило, моделируют системой обыкновенных дифференциальных уравнений, в которых учитывают эмиссию ЗВ по отраслям экономики соотнося ее либо к производственным возможностям, либо к объёму ресурсов (h), потребляемых производственной системой. Также в модели учитывают возможности окружающей среды по ассимиляции загрязнений. Кроме того, может быть необходимость учитывать баланс (P) выноса загрязнений из региона и входящего потока из других регионов:

$$\frac{dS}{dt} = a_1 h(t) - a_2 S - P, \quad (1)$$

a_1 – коэф. эмиссии конкретного вида ЗВ на единицу потребленного ресурса,
 a_2 – коэф. ассимиляции ЗВ окружающей средой,

$S=(S^{\text{пов}}, S^{\text{вода}}, S^{\text{грунт}})$ – накопленные загрязнения, с соответствующими компонентами:

$$\begin{aligned} S^{\text{пов}} &= (S^{\text{пов}}_1, \dots, S^{\text{пов}}_l) - \text{ЗВ в воздухе,} \\ S^{\text{вода}} &= (S^{\text{вода}}_1, \dots, S^{\text{вода}}_m) - \text{ЗВ в воде,} \\ S^{\text{грунт}} &= (S^{\text{грунт}}_1, \dots, S^{\text{грунт}}_p) - \text{ЗВ в грунте.} \end{aligned}$$

С помощью модели (1) можно оценить критерий интегральной оценки регионального загрязнения среды:

$$S_j(T_j) = \int_{T_j} S_{nj}(t_n) dt, j \in [1; N],$$

где S_{nj} – общее загрязнение для j -ЗВ в n -м периоде.

Оценка ущерба для окружающей среды и здоровья населения в результате воздействия загрязнения. Сам по себе критерий интегрального загрязнения не столь важен, сколько важна оценка ущерба для окружающей среды и здоровья населения в результате воздействия загрязнения. Например, экологический ущерб может быть рассчитан – как биосферные потери в регионе (Σ_0)[4]:

$$Y = \int_0^T dt \int_{\Sigma_0} p_0 S d\Sigma, p_0 = \sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^s n_l \beta_l b_{lj}$$

n_l – плотность l -популяции в регионе; b_{lj} – потери биомассы на единицу плотности l -популяции от j -ЗВ; β_l – стоимость единицы l -компонента биомассы.

При этом в отдельных зонах Σ_k необходимо соблюдать как условие обеспечения нормативов качества воздуха: $S_{kj} \leq S_{kj \text{ доп}}$,

так и условий обеспечения экологически безопасных рисков для окружающей среды $r_{kj} = p Y_j \leq r_{kj, \text{безп}}$, где p – степень риска, вероятность проявления опасных последствий факторов риска – токсичных эффектов поражения.

При аварии будет происходить перемещение людей – эвакуация. Это усложняет прогноз поражения, т. к. люди на маршруте эвакуации будут проходить подзоны с различной по величине концентрацией. Поэтому для такой ситуации оценкой поражения будет являться определение *токсодозы* для людей, попавших в зону Σ_k химического загрязнения:

$$TD = \int_0^t C(\Sigma, t) dt,$$

где t – время экспозиции; C – концентрация вредного вещества.

Моделирование задач региональной экологической безопасности. Таким образом, первой важной задачей (управления качеством воздуха)

является обеспечение стратегически направленных механизмов экологического управления (u) в регионе по уменьшению в некотором периоде (как правило год) выбросов (Q) от пространственно распределенных источников формирующих загрязнения (S) ниже уровня нормативных стандартов качества воздуха в k-зоне:

$$\min_{\{u(t, \Sigma)\}} \int_t \int_{\Sigma_k} S(Q, u, \Sigma, t) d\Sigma dt \leq S_{k \text{ норм}}$$

Согласно действующей нормативной методике, в случае присутствия в атмосферном воздухе одновременно n загрязняющих веществ, что проявляют суммацию вредного воздействия, то для каждой группы таких веществ рассчитывается суммарная концентрация: $S = (c_1/\text{ПДК}_1) + (c_2/\text{ПДК}_2) + \dots + (c_n/\text{ПДК}_n)$; где c_1, c_2, \dots, c_n (мг/м³) – расчетные концентрации ЗВ в одной и той же точке; ПДК₁, ПДК₂..ПДК_n (мг/м³) – соответствующие максимально разовые предельно-допустимые концентрации ЗВ в атмосферном воздухе. Или же значение концентраций n ЗВ, проявляющих суммацию вредного воздействия, приводятся условно к значению концентрации одного из них: $S = c_1 + c_2 \cdot \text{ПДК}_1/\text{ПДК}_2 + \dots + \text{ПДК}_1/\text{ПДК}_n$.

Второй задачей (региональной экологической безопасности) является проведения мероприятий (u) минимизации до приемлемого уровня рисков вредных эффектов организованных и неорганизованных выбросов мощности (Q) как на отдельные элементы экосистемы, так и на их общие эмерджентные характеристики и функции (E):

$$\min_{\{u(t, \Sigma)\}} \int_t \int_{\Sigma_k} R(Q, u, E, \Sigma, t) d\Sigma dt \leq r_{k \text{ норм}}$$

Для учета возможных чрезвычайных ситуаций и аварийных выбросов с целью предупреждения возникновения и ликвидации последствий, используем формулу [5] полного риска $r(Y, A)$ эколого-экономических потерь (Y) на конечном множестве $A = \{e_{i,A}\}$, $i=1..N$, независимых сценариев $e_{i,A}$ аварий, каждый из которых в сочетании с некоторыми независимыми неблагоприятными условиями – элементами конечного множества $\theta_k \in \Theta$, $k=1..K$, приводит к ущербу $Y(e_{i,A}, \theta_k)$:

$$r(Y, A) = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K p(e_{i,A}, \theta_k) Y(e_{i,A}, \theta_k),$$

где $p(e_{i,A}, \theta_k)$ – полные вероятности пересечения i -аварийных сценариев $e_{i,A} \in A$, $i=1..N$, с неблагоприятными условиями $\theta_k \in \Theta$, $k=1..K$, вероятности которых считаются заданными. Неблагоприятные условия в месте возникновения опасного источника ЗВ, в первую очередь определяются метеоусловиями, которые определяют характер и направленность развития зоны токсического поражения, наличием поблизости средств и сил противодействия ЧС.

База возможных сценариев опасных выбросов в результате природных и техногенного характера включает: промышленные аварии, аварии на транспорте, теракты, взрывы, пожары, землетрясения, наводнения, ураганы. Если на их основе построить полную группу наиболее вероятных событий $e_i \in E, i = 1..N$ с применением байесового подхода, то для определения полной вероятности экологического ущерба в регионе достаточно задать структурную функцию $\Psi(S)$ надежности (экобезопасности региональной системы), такую, что $\Psi(S) : E \rightarrow A$.

Таким образом оценив плотность распределения вероятности данных событий по территории и рассчитав вероятное пространственно-временное распределение вредного фактора (вероятность контакта с реципиентами риска) можно определить: $p(e_{i,A}, \theta_k) = p(e_{i,A})p(\theta_k)$ и на основе экономической оценки природных ресурсов и потерь для здоровья можно оценить уровень риска региональной экологической безопасности от возможных чрезвычайных ситуаций.

Моделирование пространственного распределения полей концентрации ЗВ. Для построения универсальной математической модели пространственного распространения загрязнений в качестве базового, используем уравнение адвекции-диффузии с учетом параметризации основных физико-химических процессов [4].

В зависимости от физико-химических особенностей конкретного сценария загрязнения атмосферы будем добавлять соответствующие слагаемые (осадки, фото-химическая и биологическая трансформация).

Постановка краевых условий для данного уравнения рассмотрена в работах [2,3]. Для численного интегрирования уравнения переноса примеси в атмосфере применяется неявная разностная схема. Детально численное интегрирование модели переноса описано в работах [2,6].

Для основной региональной сетки используется двумерная численная модель потока воздуха в сложной местности - на основе упрощенных уравнений потока и нелинейного уравнения переноса оторванного вихря. В области потока, рассеивания загрязняющих веществ численно моделируется с помощью первого порядка замыкания (К-теория). Трехмерное моделирование потенциального потока используется для локальных расчетов скорости ветра сложной местности.

Выводы. Предложен комплексный подход к созданию математической модели и ее численной реализации, позволяющий рассчитать динамику регионального и локального загрязнения атмосферного воздуха вследствие хозяйственной деятельности и возможных чрезвычайных ситуаций. Особенностью численной модели является использование подсеточных областей с дополнительными моделями параметризации процессов при необходимости детализации расчета. Для учета физико-химических особенностей различных сценариев выбросов (разливы, пожары, взрывы) необходимо формирование базы эмиссионных моделей. Модель может быть

использована при решении региональных задач в области экологической безопасности и управления качеством воздуха.

Список литературы

1. COST-710-WG3.Final report. Harmonisation of the pre-processing of meteorological data for atmospheric dispersion models//Edited by B.E.A.Fisher and others.-Luxemburg.European Communities:1998 – 480 p.
2. Беляев Н. Н. Математическое моделирование в задачах экологической безопасности и мониторинга чрезвычайных ситуаций: Монография / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько, П. Б. Машихина. – Д.: «Акцент ПП», 2013. – 159 с.
3. Беляев Н. Н. Моделирование нестационарных процессов аварийного загрязнения атмосферы: Монография / Н. Н. Беляев, А. В. Берлов, П. Б. Машихина. – Д.: «Акцент ПП», 2014. – 127 с.
4. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Марчук Г. И. – М.: Наука, 1982. – 320 с.
5. Стефанишин Д.В. Вибрані задачі оцінки ризику та прийняття рішень за умов стохастичної невизначеності.-К.:Азимут-Україна, 2009. – 104 с.
6. Biliaiev M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography / M. Biliaiev // Springer: Air Pollution Modeling and its Application XXI, 2012. pp.87 – 91.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Зберовським О.В.
Надійшла до редакції 20.01.15*

УДК 519.6

© Н.Н. Беляев, С.Г. Цыганкова

РАСЧЕТ АЭРОИОННОГО РЕЖИМА В ПОМЕЩЕНИИ И В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ НА БАЗЕ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ

Рассмотрена эффективная численная модель для прогноза аэроионного режима в помещениях и в рабочих зонах. Модель основывается на применении уравнений аэродинамики, электростатики и массопереноса.

Розглянута ефективна чисельна модель для прогнозу аероіонного режиму в приміщеннях і в робочих зонах. Модель ґрунтується на застосуванні рівнянь аеродинаміки, електростатики і масопереносу.

A numeral model allowing operatively to compute the dynamics of ion dispersion in rooms was developed. The model is based on equations of fluid dynamics, electrostatic and mass transfer.

Постановка проблемы. Как известно, для обеспечения нормального микроклимата на рабочих местах необходимо, чтобы в рабочих зонах была определенная концентрация аэроионов [1, 2-4]. Это ставит задачу разработки методов прогноза концентрационных полей аэроионов в любой части помещения для обоснования места расположения ионизаторов. В настоящее время, для решения задач такого класса требуется разработка специальных