

УДК 004.94

Моделирование переноса загрязнения окружающей среды в атмосферном воздухе и водных объектах



В.А. РЫБАК,
заведующий кафедрой
программного обеспечения
сетей телекоммуникаций,
к. т. н., доцент



О.П. РЯБИЧИНА,
старший преподаватель
кафедры программного
обеспечения сетей
телекоммуникаций,
магистр техники и технологии



А.Д. ГРИБ,
ученый секретарь

Центральный научно-
исследовательский институт
комплексного использования
водных ресурсов

УО «Белорусская государственная академия связи»

В статье рассматриваются вопросы создания, использования и программной реализации математических моделей для прогнозирования переноса загрязняющих веществ в атмосферном воздухе и водных объектах. Изложены итоги обзора существующих моделей, выделены их достоинства и недостатки. Представлены рисунки, отражающие результат моделирования в картографическом виде. Описаны основные направления использования предложенных инструментов (прогнозирование уровня загрязнения городского воздуха для нахождения оптимального пути следования пешехода с точки зрения минимизации неблагоприятного воздействия) и оценка эколого-экономической эффективности природоохранных мероприятий для молокоперерабатывающих производств.

Ключевые слова:

атмосферный воздух, водные объекты, загрязняющие вещества, моделирование, прогнозирование.

Введение. В настоящее время вопросы охраны окружающей среды и рационального природопользования становятся все более актуальными. Во многом это обусловлено двумя основными причинами. Во-первых, наличие природных ресурсов является экономическим базисом для развития экономики. Во-вторых, загрязнение среды обитания оказывает непосредственное влияние на здоровье людей, их самочувствие и продолжительность жизни. На современном этапе развития науки уже не возникает вопрос, влияет ли качество природных сред на здоровье населения. Изучены и статистически подтверждены зависимости уровня заболеваемости людей, например, от степени загрязнения воздуха различными химическими компонентами. При этом концентрации даже ниже предельно допустимых оказывают выраженное неблагоприятное воздействие. Вместе с тем вопросам переноса загрязнителей в различных средах уделяется недостаточно внимания.

Основная часть. В работе приводятся результаты создания и использования математических моделей для контроля уровня загрязненности атмосферного воздуха и водных объектов с учетом переноса под воздействием движения воздушных масс и течения.

Атмосферный воздух

По степени и скорости воздействия на организм человека атмосферный воздух стоит на первом месте. При этом условия аварийных выбросов очень отличаются как от условий ядерных взрывов, так и от стационарной работы дымовых труб (рис. 1) [1].

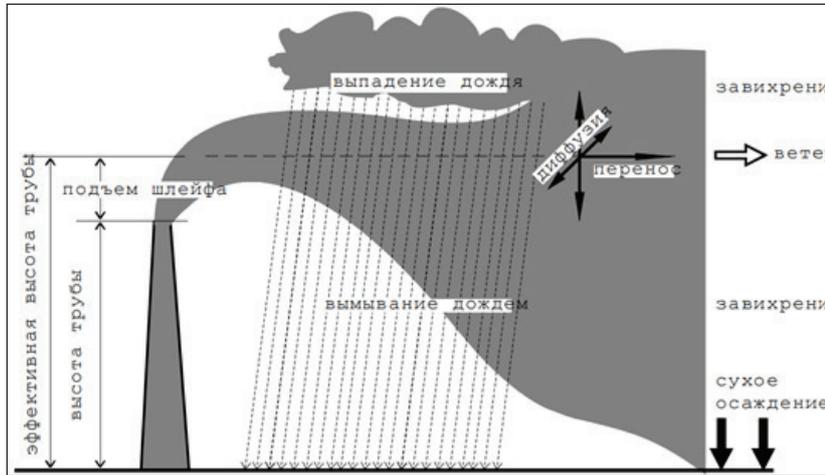


Рисунок 1 – Поведение загрязняющих веществ, выброшенных в атмосферу

Для расстояний до 10 км используют модель Паскуилла – Гиффорда, которая является также рабочей моделью Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ). Данная модель является эмпирической. В ее основе лежит представление концентрации примеси, выбрасываемой непрерывным точечным источником в атмосфере, как струи с гауссовыми распределениями по вертикали и в поперечном к ветру направлении [1]:

$$q(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y(x)\sigma_z(x)u} \cdot f_F \cdot f_W \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2(x)}\right) \cdot \left(\exp\left(-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2(x)}\right) + \exp\left(-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2(x)}\right) \right) \quad (1)$$

где x, y, z – декартовы координаты, ось z – вверх, ось x – по ветру; h – эффективная высота источника (т. е. высота с учетом первоначального подъема перегретой струи); Q – мощность источника выброса; q – концентрация примеси в данной точке пространства; u – скорость ветра, усредненная по слою перемешивания; $\sigma_y(x)$ и $\sigma_z(x)$ – вертикальная и поперечная дисперсии облака примеси; f_F и f_W – поправки на обеднение облака за счет сухого осаждения примеси и ее вымывания осадками.

При этом метеорологические условия подразделяются на 6 классов устойчивости атмосферы (от А до F). Распределение скорости ветра считают степенной функцией. Конкретные формулы для дисперсий $\sigma_y(x)$ и $\sigma_z(x)$ различны для разных

рельефов местности. Обычно местности делят на равнинные, сильно пересеченные, сельскую местность, лес, город. Возможно также использование более общих формул с заданием параметра шероховатости земной поверхности. Есть некоторые рекомендации для более сложных случаев. Однако

при сложном рельефе или при наличии крупных водоемов рекомендуется проводить натурные эксперименты, без которых применение модели становится некорректным. Отметим, что реализация этой модели на ЭВМ достаточно проста и время расчетов по ней пренебрежимо мало по сравнению с вводом и выводом информации. При появлении новых сведений для конкретной местности модель несложно пополнять [2].

До настоящего времени продолжается совершенствование моделей данного вида. Так, созданы

различные версии модели TUPOS, в которых учитывается отличие направления и величины скорости ветра на уровень струи (от показываемых флюгером), более детально моделируется взаимодействие с лежащим выше струи теплым слоем воздуха (при наличии инверсии), уточняются коэффициенты. Поскольку эти модели чисто эмпирические, единственным критерием совершенствования является лучшее соответствие экспериментальным данным.

Наиболее совершенной в практическом применении является в настоящее время модель, созданная в Институте экспериментальной метеорологии (ИЭМ). Она используется как официальная модель для расстояний до 100 км и в равной степени пригодна для описания распространения облака, созданного мгновенным источником, и струи от непрерывного источника. Процесс диффузии в перпендикулярных к ветру направлениях рассматривают как функцию времени, в отличие от чисто пространственных распределений в модели Паскуилла – Гиффорда. Данная модель при наличии только простейших метеоданных, т. е. однократного измерения скорости и направления ветра на уровне флюгера, почти не имеет преимуществ по сравнению с более простой моделью Паскуилла – Гиффорда. Ее преимущества реализуются с увеличением информации [1].

При анализе различных моделей распространения примесей в атмосфере, пригодных для оценки последствий аварий на объектах атомной

энергетики, рассмотрены три типа: гауссовские модели, модели лагранжева облака и трехмерные модели. Основное отличие трехмерных моделей состоит в явном расчете диффузии и переноса примеси. Для этого приходится численно решать начально-краевую задачу для трехмерного уравнения параболического типа. Отметив совершенство такого рода моделей, мы должны констатировать, что отсутствие необходимых для их использования исходных данных и инфраструктуры (реальные заказы и квалифицированные пользователи) не позволяет рассчитывать на практическое применение в ближайшем будущем. Они остаются научно-исследовательскими моделями, хотя в каких-то ситуациях необходимые затраты были бы оправданы.

При расчете острых рисков необходимо вычисление максимальных разовых (средних за 20 минут) концентраций загрязняющих веществ. Для этого в нашей стране используется нормативная модель расчета разовых концентраций ОНД-86. Хронические и канцерогенные риски при вдыхании вычисляются исходя из среднегодовых концентраций загрязняющих веществ. Для этой цели разработана в качестве дополнения к ОНД-86 нормативная модель расчета концентраций, осредненных за длительный период [3].

Таким образом, для разработки математической модели и программной реализации была выбрана модель на основе ОНД-86, т. к. она является действующей в Беларуси в настоящее время.

С учетом практической направленности исследований исходными данными для работы являются: радиус выброса, концентрация, коэффициент скорости оседания. Актуальные данные о направлении и скорости ветра берутся из метеорологических интернет-источников. В результате моделирования получается нанесенная на карту зона распространения загрязнителя с количественными градациями, выделенными разным цветом (рис. 2).

Получаемые таким образом прогнозы используются далее для построения наиболее безопасного маршрута людей в городах с учетом измеренной и ожидаемой концентрации загрязняющих веществ.

Водные ресурсы

Жизненно важную роль для здоровья населения также играет качество водных ресурсов. На сегодняшний день, несмотря на квантовый скачок в развитии технологий, не удается решить глобальную проблему обеспечения людей чистой водой. Для Республики Беларусь данный вопрос не стоит так остро, но защите и рациональному использованию водных ресурсов необходимо уделять достаточное внимание.

Являясь государством с хорошо развитым сельскохозяйственным производством, Беларусь вынуждена решать такие важные научно-практические задачи, как контроль смыва удобрений и пестицидов с полей в поверхностные водные объекты, очистка сбросов от молокоперерабатывающей промышленности и коммунального хозяйства, и т. п.

Вместе с тем аварийные сбросы в водные объекты во всем мире стали одним из источников экстремальных экологических ситуаций. Загрязняющие вещества, попадая в водотоки, стремительно распространяются на большие расстояния, загрязняя источники водоснабжения, мешая водопользованию, вызывают гибель рыб и животных, загрязняют заливные луга, орошаемые сельскохозяйственные территории. В зависимости от количества и типа сброшенных веществ, восстановление речной экосистемы после сброса может занять годы [4].

Моделирование водных систем представляет собой сложный процесс. Разработка моделей экосистем водных объектов невозможна без гидродинамической составляющей. Водные системы характеризуются наиболее выраженным движением вследствие различных природно-климатических,

географических особенностей, ветровыми напряжениями, достаточно большим биологическим разнообразием популяций флоры и фауны водоемов, большими перепадами глубин, наличием различных гидротехнических сооружений. Поэтому для получения качественных результатов прогнозирования распространения загрязняющих веществ в водных системах необходимо построение более точных математических моделей,

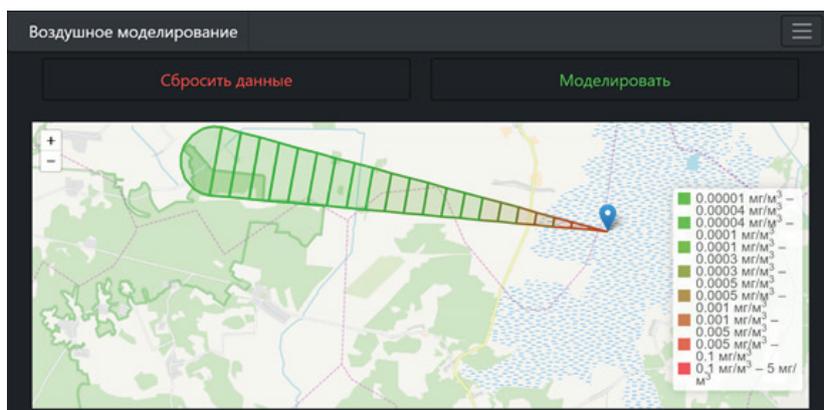


Рисунок 2 – Моделирование переноса загрязняющих веществ в воздухе

учитывающих вышеперечисленные факторы и особенности данных водоемов. К числу работ, посвященных математическому моделированию распространения загрязняющих веществ в водных системах, относятся труды ученых Матишова Г.Г., Муравейко В.М., Бердникова С.В., Ильина Г.В., Зуева А.Н., Ильичева В.Г., Кравченко В.В. и др. [5].

В основе математических моделей транспорта загрязняющих веществ и различного рода примесей и взвесей лежат системы дифференциальных уравнений в частных производных, которые отражают основные законы физики и описывают движение жидкости в прибрежной системе и перенос в ней различных веществ. Большинство моделей транспорта загрязняющих веществ в водоемах включают уравнения диффузии-конвекции, гидродинамическую составляющую, уравнение переноса вещества. Существующая пространственно-трехмерная модель распространения загрязняющих веществ в мелководном водоеме, включающая задачу транспорта примеси и гидродинамическую составляющую мелкой воды, базируется на математических моделях Сухинова А.И., Васильева В.С., Никитиной А.В., Чистякова А.Е.

Однако данная модель обладает недостатком: в ней не учитываются в полной мере биологические процессы деструкции загрязняющего вещества, оказывающие в свою очередь большое влияние на динамику распространения загрязнения в водной системе. Это снижает точности адекватного прогнозирования распределения концентраций вредных веществ в водоеме и в дальнейшем негативно отражается на экологической обстановке природных экосистем.

В связи с большой сложностью и материальными затратами для проведения натурных измерений в условиях реального водоема качественная и количественная оценки распространения загрязняющих веществ производится преимущественно с помощью средств математического моделирования на основе полученных в лабораторных условиях параметров. Достаточно подробный анализ подобных моделей приведен в работах Анцыферова С.М., Белоцерковского О.М., Гущина В.А., Марчука Г.И. Обзор моделей транспорта загрязняющих веществ, построенных на основе большого количества проведенных лабораторных и натурных измерений, также приведен в работах Дебольского В.К., Зайдлера Р., Масселя С. и др.

Модели распространения вредных веществ в водных средах несколько сложнее, чем модели атмосферной диффузии. Дело в том, что водная среда богаче на процессы взаимодействия с вносимыми в нее примесями [6].

Основными процессами, определяющими распространение вредных веществ в поверхностных водах, являются:

- 1) перенос с перемещающимися массами воды;
- 2) турбулентная диффузия примесей;
- 3) осаждение на дне водоема вредных веществ, находящихся в форме взвесей и коллоидных частиц;
- 4) переход осадков, содержащих вредные вещества, вновь во взвешенное состояние;
- 5) сорбция и десорбция вредных примесей различного рода неорганическими и органическими веществами;
- 6) захват биотой;
- 7) разложение и распад (в т. ч. радиоактивный) вредных веществ и т. п.

С учетом этого основное уравнение дисперсии вредных (опасных) веществ в воде, движущим началом которой является совокупность процессов переноса и диффузии, имеет вид:

С учетом этого основное уравнение дисперсии вредных (опасных) веществ в воде, движущим началом которой является совокупность процессов переноса и диффузии, имеет вид:

$$\frac{dC}{dt} = A + D - R + P - \theta, \quad (2)$$

где C – концентрация вещества; A – изменение концентрации вещества, обусловленное его переносом с потоком водных масс, обычно называемом адвекцией; D – изменение концентрации вещества за счет диффузии; R – убыль вещества из водной среды за счет осаждения на взвесах с последующим отложением; P – изменение концентрации за счет различного рода источников и стоков, седиментации, поглощения биотой (биологического захвата) и т. п.; Q – убыль вещества за счет разложения и распада.

В приведенном выше уравнении адвекция и диффузия и осаждение вредных веществ на взвесах описываются уравнениями [5]:

$$A = U \frac{dC}{dx} + V \frac{dC}{dy} + W \frac{dC}{dz}, \quad (3)$$

$$D = \frac{d}{dx} \left(K_x \frac{dC}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left(K_y \frac{dC}{dy} \right) + \frac{d}{dz} \left(K_z \frac{dC}{dz} \right), \quad (4)$$

$$R = m \cdot S \frac{dC}{dt}, \quad (5)$$

где U, V, W – скорости перемещения водных масс по направлениям осей; x, y, z – составляющие коэффициента диффузии; S – концентрация взвешенных отложений; m – коэффициент равновесного распределения вещества между отложениями и водой.

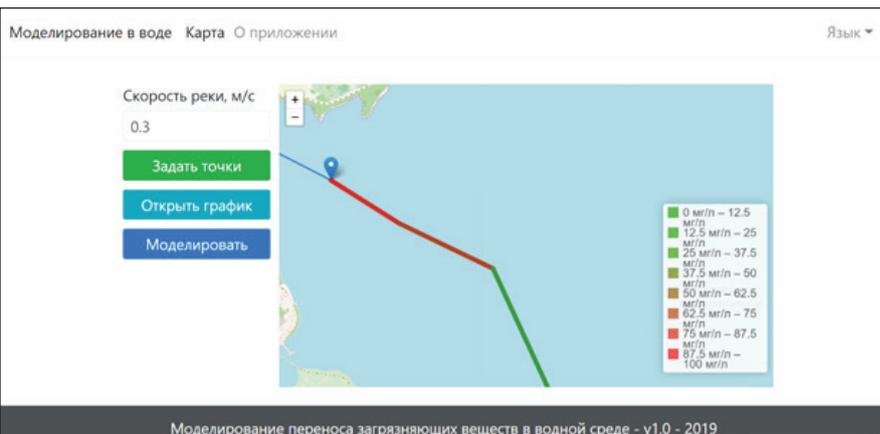


Рисунок 3 – Моделирование переноса загрязняющих веществ в водном объекте

С учетом выполненного анализа существующих моделей и программных средств была разработана и программно реализована система прогнозирования переноса загрязнителей в поверхностных водных объектах. Исходными данными являются: координаты точки сброса, скорость реки, концентрация и масса сброса. Кроме автоматического режима решения системы уравнений, у пользователя имеется возможность задать частные решения в виде набора точек концентрации и времени, а затем, используя методы интерполяции, получить график изменения данных параметров, и использовать полученный результат для моделирования и отображения на карте (рис. 3).

Получаемые с использованием математической модели и программного средства прогнозы применяются, например, для оценки эколого-экономической эффективности природоохранных мероприятий для производств, осуществляющих переработку молока. То есть для повышения экологичности современных

существующих и проектируемых производств объемы выбросов и сбросов на единицу выпускаемой продукции должны стремиться к нулю, а затраты на системы очистки должны быть меньше, чем получаемый эффект, обусловленный снижением экологических платежей и антропогенной нагрузки.

Заключение. Развитие информационных технологий, вычислительных ресурсов компьютерной техники, высокоскоростных телекоммуникационных сетей локального и регионального масштаба обеспечило предпосылки для создания корпоративных систем. Эффективное хозяйствование на территории требует не только мониторинга ее объектов,

но и понимания природы и движущих сил происходящих процессов, умения строить управление на причинно обоснованных прогнозах. Здесь могут найти практическое применение и научные, и прикладные модели, но для этого необходимо развивать инфраструктуру, облегчающую их использование и расширяющую сферу применения. В современных условиях это немыслимо без использования информационных технологий [1].

В рамках проведенных исследований были разработаны и апробированы математические модели и их программная реализация для прогнозирования переноса загрязняющих веществ в атмосферном воздухе и водных объектах. Первые из указанных решений используются для составления актуальных карт загрязнения и нахождения оптимального маршрута следования в городе с точки зрения неблагоприятного воздействия. Вторые – для оценки эколого-экономической эффективности природоохранных мероприятий для молокоперерабатывающей промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Замай, С.С.** Модели оценки и прогноза загрязнения атмосферы промышленными выбросами в информационно-аналитической системе природоохранных служб крупного города: учебное пособие / С.С. Замай, О.Э. Якубайлик. – Красноярск, 1998. – С. 39–48.
2. ОНД-86 Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий.
3. Мониторинг атмосферного воздуха. Белгидромет [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rad.org.by/monitoring/air/>. – Дата доступа: 27.05.2019.
4. **Владимиров, В.А.** Катастрофы и экология / В.А. Владимиров – М.: Центр стратег. исслед. МЧС: Контакт-Культура, 2000. – 379 с.
5. Мониторинг поверхностных вод в Беларуси. Белгидромет [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rad.org.by/monitoring/aqua.html/>. – Дата доступа: 10.05.2019.

The article discusses the creation, use and software implementation of mathematical models for predicting the transport of pollutants in atmospheric air and water bodies. The results of the review of existing models are presented, their advantages and disadvantages are highlighted. Presented are drawings reflecting the resulting simulation result in a cartographic form. The main directions of using the proposed tools are described - predicting the level of urban air pollution to find the optimal route for pedestrians from the point of view of minimizing adverse effects, and assessing the environmental and economic effectiveness of environmental measures for milk processing plants.

Получено 22.09.2019.