

Раздел I. Математическое моделирование задач аэро- и гидродинамики

УДК 681.3.06:502.504

В.К. Гадельшин, Ю.А. Мещерякова, С.Ю. Румилова

МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КОНЦЕНТРАЦИЙ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРЕ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ И МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПО ГОРОДУ ТАГАНРОГУ

Рассматривается задача оперативного прогноза уровня загрязнения в городе Таганроге. Разработан программный комплекс, включающий базу данных измерений, осуществляющий группировку данных на основе алгоритмов кластеризации и методов распознавания образов, реализующий процедуру оперативного прогнозирования концентрации вредных веществ в атмосфере при заданных параметрах, распространение результатов прогноза методами математического моделирования на области, прилегающие к транспортным магистралям, а также интернет-приложение, позволяющее производить оперативный прогноз в режиме онлайн.

Прогнозирование; кластеризация; автомобильные выбросы; загрязнение атмосферы; распознавание образов; мониторинг; распространение загрязнения; MVC.

V.K. Gadelshin, J.A. Meshcheryakova, S.Y. Rumilova

MONITORING AND FORECASTING OF ATMOSPHERIC POLLUTANT CONCENTRATIONS BASED ON THE STATISTICS OF THE CITY OF TAGANROG

The problem of the operational forecasting of the pollution in the control points in the city of Taganrog. A software package that includes a database of measurements, performing group-based data clustering algorithms and pattern recognition methods, implementing procedures for operational forecasting of concentration of harmful substances in the atmosphere at the given parameters, as well as web-based application that allows you to produce an operational forecast online. The examples of test calculations.

Forecasting procedure; clustering; emissions from vehicles; air pollution; of pattern recognition; monitoring; spread of contamination; MVC.

Проблемы состояния атмосферы требуют беспромеделительного решения. Согласно оценкам, в городах на долю автотранспорта приходится (в зависимости от развития в данном городе промышленности и количества автомобилей) от 30 до 70 % общей массы выбросов. В частности в Таганроге в 2012 г. доля выбросов от автотранспорта в городе составила 75,3 % от общего объема выбросов [6].

Чтобы защитить людей от незаметных на первый взгляд воздействий малых доз загрязнителей, очень важно проводить мониторинг воздушной среды, т.е. наладить систему постоянного наблюдения и регулярного контроля, проводимых по определенной программе мероприятий для оценки ее текущего состояния, анализа всех происходящих в ней в данный период процессов, а также заблаговременного выявления возможных тенденций ее изменения.

Сложность проведения регулярных трудоемких натурных экспериментов для оперативной и долговременной оценки и прогнозирования состояния воздушной среды приводит к необходимости применения вычислительных экспериментов методами математического моделирования и обработки статистических данных.

В данной работе предлагается метод и программный комплекс, позволяющие на основе статистических данных по выбросам загрязняющих веществ автотранспортом в экологически проблемных местах г. Таганрога выполнять оперативный прогноз концентрации вредных веществ в атмосфере при заданных метеорологических условиях и составе автотранспортного потока, а также методами математического моделирования распространять прогнозирование на территории, прилегающие к транспортным магистралям.

Для оперативного прогноза концентрации загрязняющих веществ разработан алгоритм, состоящий из следующих процедур: создание базы данных, выборка данных из БД по точечным и интервальным запросам; выявление решающих параметров; нормализация данных; классификация замеров по месту и метеоусловиям; группирование замеров на основе алгоритмов кластеризации; выявление принадлежности исходной точки к тому или иному кластеру; формирование прогноза концентрации веществ, характерных для данной группы замеров; распространение результатов прогноза проводимых измерений методами математического моделирования на территории, прилегающие к транспортным магистралям; создание интерактивного веб-приложения для мониторинга состояния уровня загрязненности атмосферы.

Исходными данными являются замеры следующих факторов:

1. Перекресток – место, где устанавливался газоанализатор по направлению ветра, т.е. таким образом, чтобы в него попадал воздух с перекрестка.
2. Дата и время проведения замера.
3. Сведения о количестве различных видов транспорта, проезжающего данный перекресток в установленный промежуток времени.
4. Метеоусловия:
 - ◆ давление (представлено в миллиметрах ртутного столба);
 - ◆ $T_{\text{сух}}$ – температура сухого термометра (представлена в градусах Цельсия);
 - ◆ $T_{\text{влаж}}$ – температура влажного термометра (представлена в градусах Цельсия);
 - ◆ влажность (представлена в процентах);
 - ◆ скорость ветра (представлена в метрах в секунду);
 - ◆ направление ветра;
 - ◆ облачность.
5. Пробы – представляют собой информацию о концентрации вещества в воздухе и предельно допустимой концентрации (представлены в миллиграммах на метр кубический).

Пример исходных данных приведен в табл. 1.

Таблица 1

Перекресток:		Морозова - Дзержинского			Дата:	04.09.2000	Время:	13:15-14:50		
Тип машины	Кол-во	Метеоусловия		Газы	Пробы					Норма
Грузовые	60	Давление	755	NO ₂	0.052	0.034	0.041	0.05		0.085
Легковые	550	$T_{\text{сух}}$	24.6	SO ₂	0.12	0.10	0.09	0.10		0.5
Дизельные	60	$T_{\text{влаж}}$	19.8	форм	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01		0.035
Автобусы	20	Влажность	42	сажа	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025		0.15
Мотоциклы	2	Напр. ветра	Переменный	озон	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015		0.16
Трактора	2	Скорость	3	СО	4.3	4.8	5	4.6		5
		Облачность	Ясно							

В качестве среды разработки самой программы для работы с базой данных была выбрана среда программирования Microsoft Visual C# Express, использующая язык программирования C#. Наиболее удобное средство разработки программ – язык C#, так как он ориентирован на создание приложений для работы с БД и на формирование удобного, интуитивно понятного интерфейса. Также в нем реализована возможность работы с XML-документами, что облегчат работу по созданию анализирующих частей в клиент-серверном приложении. Он предлагает разработчику ряд готовых стандартных решений для выполнения необходимых задач [1].

Первым шагом на пути построения базы данных был выбор СУБД. Из списка наиболее популярных для реализации базы данных по хранению замеров было решено использовать Microsoft SQL Server 2008 R2 Express, который распространяется бесплатно и поддерживает до 10 ГБ на одну базу данных. Далее были определены требования к создаваемой базе данных, построена ER-диаграмма и выполнена нормализация. Для построения база данных вполне достаточно было привести таблицы к нормальной форме Бойса–Кодда. В результате были получены следующие таблицы [14]:

- ◆ Замеры (Код замера (Первичный ключ), Код места, Дата замера, Время начала замера, Время конца замера);
- ◆ Метеоусловия (Код замера (Первичный ключ), Код направления ветра, Скорость ветра, Давление, $T_{\text{сух}}$, $T_{\text{мокр}}$, Влажность, Тип погоды);
- ◆ Направление ветра (Код направления ветра (Первичный ключ), Название);
- ◆ Тип погоды (Тип погоды (Первичный ключ), Название);
- ◆ Место измерения (Код места (Первичный ключ), Название);
- ◆ Состав потока транспорта (Код замера (Первичный ключ));
- ◆ Вещества (Номер пробы (Первичный ключ), Код замера, Код вещества, Значение);
- ◆ Типы веществ (Код вещества (Первичный ключ), Название);
- ◆ ПДК веществ (Код вещества (Первичный ключ), ПДК, Чувствительность).

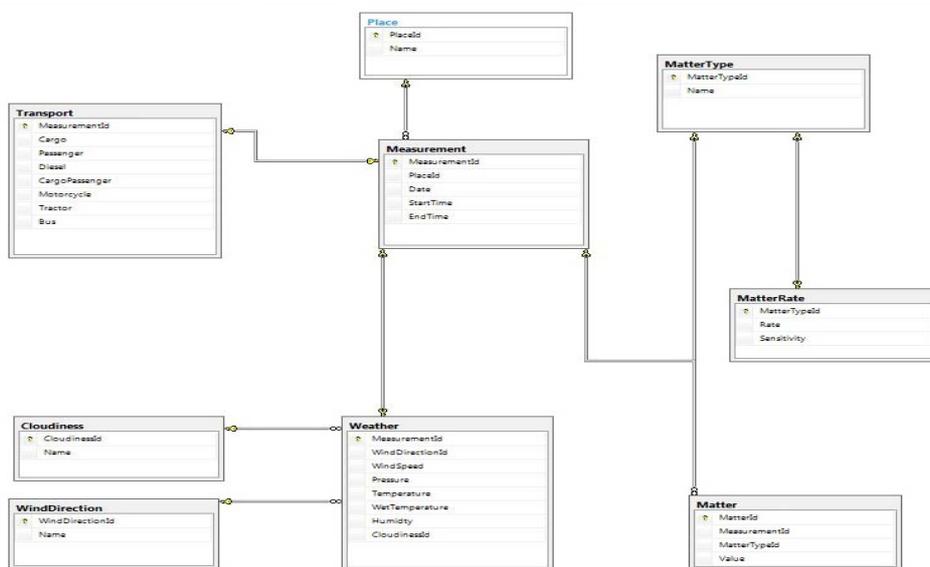


Рис. 1. Структура базы данных

Импорт данных из БД в программу осуществляется с помощью стандартных функций ADO.NET. Решающими параметрами выбраны: место проводимых измерений (на концентрацию вредных веществ в атмосфере имеет влияние рельеф местности и застройка); тип погоды; температура; давление; скорость ветра; количество машин по типам.

Общий вклад загрязняющих веществ, вносимых каждым элементом, определяется расчетным путем с использованием коэффициентов, полученных с применением методики, изложенной в [9]. При разных значениях коэффициентов проведена верификация базы данных и выбраны те, для которых получено наименьшее расхождение между исходными и прогнозируемыми значениями концентраций. Подобная практика использования коэффициентов встречается в работах [1], в которых оценивалось влияние каждого метеопараметра на степень загрязнения, и полученные результаты использовали для составления прогноза загрязнения. После нормализации данные представляются в удобном для использования виде.

С помощью методов кластеризации [9] получают группы замеров, распределенные по признакам. Анализ алгоритмов кластеризации показывает, что для решения данной задачи рационально использовать минимаксный алгоритм для расстановки центров и алгоритм «ближайшего соседа» для кластеризации, поскольку он прост для реализации, обучается быстрее и не чувствителен к размерности (по сравнению с алгоритмом k-means) [1].

Данные о концентрации примеси и относящиеся к ним ситуации группируются так, чтобы выделить 6 групп (кластеров) значений потока, причем сначала формируются группы по месту замера (количество – 6), затем подгруппы по типу погоды (количество – 3 для каждого класса) [2].

Если считать, что среди проведенных наблюдений зафиксированы все возможные метеорологические ситуации, то прогноз методом распознавания образов связан с выбором из множества кластеров таких ситуаций (кластеров), которые близки к «прогнозируемой». В основе применения метода распознавания образов лежит представление о том, что большие концентрации примесей связаны с вполне определенными метеорологическими ситуациями и характером предшествующего загрязнения воздуха. Конкретный комплекс характеристик используется для определения группы, к которой можно отнести прогнозируемую ситуацию (процедура «обучения»). Для каждой конкретной ситуации, характеризуемой в фазовом пространстве точкой y с координатами $y_1, y_2 \dots y_N$, определяется расстояние до центра тяжести кластера

$$\rho_i^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{y_i - x_i^{(1)}}{\sigma_i^{(1)}} \right)^2. \quad (1)$$

Аналогично находится расстояние до остальных групп.

Ситуация y относится к той группе, расстояние до которой минимально. Далее считается средняя концентрация каждого вещества, характерного для данного кластера:

$$x_i = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n}, \quad (2)$$

где n – количество элементов в кластере, x_j – концентрация вещества.

Используя данные о концентрации, полученные прогнозированием, можно контролировать ситуацию загрязнения на автотранспортных магистралях.

Имеющиеся данные по загрязнению атмосферы при определенных метеорологических условиях и составе транспортного потока являются дискретными данными. Для решения задачи продолжения прогноза концентрации вредных веществ необходимо построить непрерывную математическую модель приземной аэродинамики, в которую входят уравнения движения по трем координатным направле-

ниям (Навье–Стокса), неразрывности, состояния, транспорта, теплоты и влаги [16]. Решение задачи рассматривается в цилиндрической системе прямоугольных координат геоинформационной системы г. Таганрога с шагом по горизонтальным координатным направлениям [16]. Характерная высота верхней границы приземного слоя атмосферы определяется процессами интенсивного переноса загрязнений

$$u'_t + (uu')'_x + (vu')'_y + (wu')'_z = -\frac{1}{\rho} p'_x + \frac{\eta_h}{\rho} (u''_{xx} + u''_{yy}) + \frac{1}{\rho} (\eta_v u'_z)'_z, \quad (3)$$

$$v'_t + (uv')'_x + (vv')'_y + (wv')'_z = -\frac{1}{\rho} p'_y + \frac{\eta_h}{\rho} (v''_{xx} + v''_{yy}) + \frac{1}{\rho} (\eta_v v'_z)'_z, \quad (4)$$

$$w'_t + (uw')'_x + (vw')'_y + (ww')'_z = -\frac{1}{\rho} p'_z + \frac{\eta_h}{\rho} (w''_{xx} + w''_{yy}) + \frac{1}{\rho} (\eta_v w'_z)'_z, \quad (5)$$

$$p'_t + (pu')'_x + (pv')'_y + (pw')'_z = 0, \quad (6)$$

$$\rho = \frac{p}{R_c T_v}, \quad (7)$$

$$T'_t + (uT')'_x + (vT')'_y + (wT')'_z = \eta_h (T''_{xx} + T''_{yy}) + (\eta_v T'_z)'_z + f, \quad (8)$$

$$s'_t + (us')'_x + (vs')'_y + (ws')'_z = \eta_h (s''_{xx} + s''_{yy}) + (\eta_v s'_z)'_z. \quad (9)$$

Уравнение транспорта вредной примеси представляет собой трехмерное нестационарное уравнение с параметризуемыми коэффициентами турбулентного обмена и постоянной деструкции:

$$\varphi'_t + u\varphi'_x + v\varphi'_y + w\varphi'_z = (\eta_h \varphi'_x)'_x + (\eta_h \varphi'_y)'_y + (\eta_v \varphi'_z)'_z + f_\varphi. \quad (10)$$

Эффект влияния подвижных источников на окружающую среду в моделях транспорта вредной примеси можно моделировать наземным линейным источником, очертания которого совпадают с их траекторией движения, при этом функция подвижного источника примеси принимает вид

$$f_\varphi = \sum_{i=1}^N E_n^i \delta(\bar{r} - \bar{r}_i). \quad (11)$$

Для определения E_n^i используется методика расчетов выброса автотранспорта [17] с учетом статистических данных.

Программный комплекс позволяет построить модель распространения загрязняющих веществ. Зная, какая концентрация вредных веществ на перекрестке будет при определенных погодных условиях, можно спрогнозировать уровень концентрации вредного вещества в окрестности перекрестка при этих же условиях. Программный комплекс учитывает метеосостояния, а также протяженность исследуемого участка.

Адаптация данного программного комплекса заключалась в том, что организована связь между ним и программой, осуществляющей кластеризацию для экспорта данных [1]. Организована автоматическая нормализация данных, добавлены параметры учета метеорологических условий [1].

Для реализации мониторинга загрязнения использовались MS SQL Server 2008 Express, ASP.NET MVC C#, а также другие паттерны проектирования в веб-приложениях для выборки, анализа.

Веб-приложение разработано на платформе MVC (модель-представление-контроллер), которая позволяет создавать приложения с обособлением различных аспектов (логика ввода данных, бизнес-логика и логика пользовательского интерфейса), обеспечивая при этом слабые связи между этими элементами. В этой платформе каждый вид логики размещается на обособленном уровне приложения. Логика пользовательского интерфейса принадлежит представлению. Логика ввода принадлежит контроллеру. Бизнес-логика принадлежит модели. Такое разделение облегчает построение приложения, поскольку позволяет концентрироваться на каждом аспекте реализации отдельно. Например, можно сконцентрироваться на представлении, не обращая внимания на бизнес-логику [1].

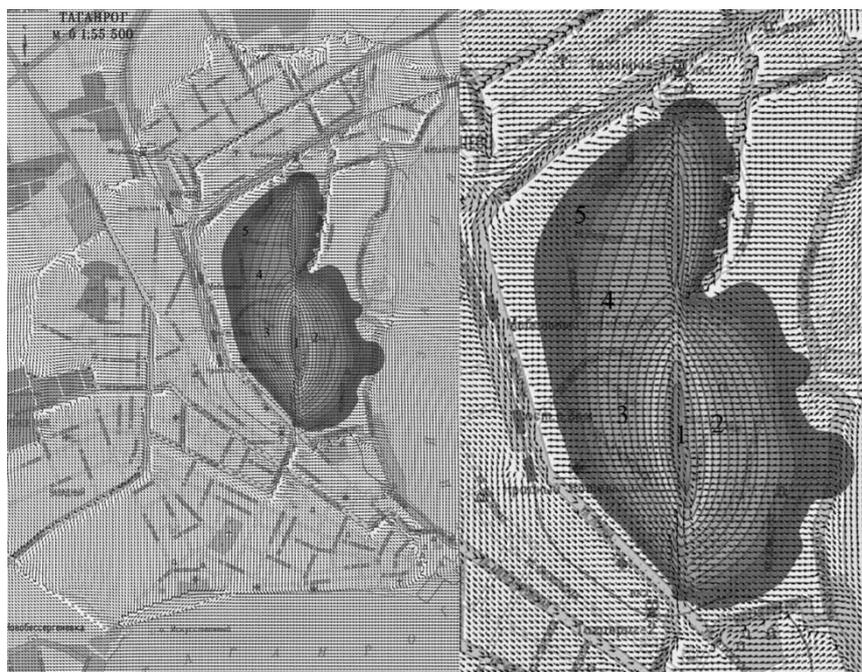


Рис. 2. Поле загрязняющих веществ от улицы им. Дзержинского

В работе описывается структура базы для хранения статистических данных по выбросам загрязняющих веществ автотранспортом в экологически проблемных местах г. Таганрога, технология разработки и структура приложения, которое предоставляет возможности просмотра, добавления, а также позволяет осуществлять выборку замеров по метеоусловиям по различным критериям в удобной для пользователя форме, отображение данных в виде графиков и на карте. Разработан удобный внешний интерфейс для работы с базой и ведения в ней статистических данных.

Приложение позволяет в интерактивном режиме пользователю добавлять, редактировать данные в БД, удобно представлять имеющуюся информацию, производить оперативный прогноз, используя карту города, производить мониторинг реального состояния воздушной среды.

Для повышения эффективности работы программного комплекса в дальнейшем предполагается добавление в него процедуры «переобучения». Приведенные в данной работе результаты подтверждают возможность построения таких схем на базе методов распознавания образов.

Программный комплекс позволяет делать прогноз концентрации вредных веществ в воздушной среде в городских условиях и может использоваться природоохранными и контролирующими организациями, занимающимися организацией системы контроля за показателями экологического воздействия транспортных потоков и оперативного управления ими с целью нормализации экологической обстановки, организациями градостроительного и транспортно-строительного профиля, выполняющими проектирование комплексных схем организации движения для отдельных участков улично-дорожной сети городов.

Разработанное приложение может быть использовано в «Центре гигиены и эпидемиологии Ростовской области» для эффективного хранения данных и мониторинга загрязнений города Таганрога.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Гадельшин В.К., Мещерякова Ю.А., Погорелова Т.И.* Прогнозирование концентраций вредных веществ в воздушной среде по статистическим данным // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 8 (121). – С. 79-86.
2. *Гадельшин В.К., Мещерякова Ю.А.* Организация процедуры прогнозирования концентраций вредных веществ в воздушной среде по статистическим данным // Научное общество студентов XXI столетия. Технические науки: Материалы V студенческой международной заочной научно-практической конференции. (11 октября 2012 г.). – Новосибирск: Сибирская ассоциация консультантов, 2012. – 220 с.
3. *Берлянд М.Е.* Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 271 с.
4. Руководящий документ. Охрана природы. Атмосфера. Руководство по прогнозу загрязнения воздуха. РД 52.04.306-92.
5. *Генихович Е.Л., Сонькин Л.Р., Гуцин В.А.* О возможности прогноза загрязнения городского воздуха методом распознавания образов // Труды ГГО. – 1969. – Вып. 238.
6. URL: www.taganrog.su (дата обращения: 19.06.2012).
7. URL: wikipedia.ru (дата обращения: 22.06.2012).
8. *Гадельшин В.К., Любимищенко Д.С., Сухинов А.И.* Математическое моделирование поля ветровых течений и распространения загрязняющих примесей в условиях городского рельефа местности с учетом к-ε-модели турбулентности // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 6 (107). – С. 49-66.
9. *Лепский А.Е., Броневиц А.Г.* Математические методы распознавания образов: Курс лекций. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – 155 с.
10. *Авдеева Т.П.* Расчет выброса загрязняющих веществ: Учеб. пособие. – Пенза, 1997. – 87 с.
11. Методика расчетов выбросов в атмосферу загрязняющих веществ автотранспортом на городских магистралях. – М.: НИИАТ, 1997. – 54 с.
12. *Назаров И.М., Николаев А.Н., Фридман Ш.Д.* Основы дистанционных методов мониторинга загрязнения природной среды. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 213 с.
13. Метеорологические аспекты загрязнения атмосферы // Сб. докладов на международном симпозиуме в Ленинграде / Под ред. М.Е. Берлянда. – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – С. 51.
14. *Карпова И.П.* Электронные лекции «Введение в базы данных». Ч. II, deti.rema44.ru/resurs/study/dblectio/dblect2.html.
15. *Троелсен Эю* Язык программирования C# 2010 и платформа .NET 4.0 = Pro C# 2010 and the .NET 4.0 Platform, 5ed. – М.: Вильямс, 2010. – 1392 с.
16. *Гадельшин В.К., Любимищенко Д.С., Сухинов А.И.* 3D-модель переноса загрязняющих веществ от автотранспорта в воздушную среду города // Известия МГТУ «МАМИ». – 2008. – № 1 (5).
17. Методика расчетов выбросов в атмосферу загрязняющих веществ автотранспортом на городских магистралях. – М.: НИИАТ, 1997. – 54 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.И. Жорник.

Гадельшин Валерий Камельянович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: valekam@gmail.com; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371606; кафедра высшей математики; к.т.н.; доцент.

Мещерякова Юлия Александровна – e-mail: life-super@yandex.ru; тел.: 89043464554; кафедра высшей математики; магистрант.

Румилова Светлана Юрьевна – e-mail: svechqa@gmail.com; тел.: 89525821572; кафедра высшей математики; магистрант.

Gadelshin Valeriy Kamelianovich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: valikam@gmail.com; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371606; the department of high mathematic; cand. of eng. sc.; associate professor.

Meshcheryakova Julia Alexandrovna – e-mail: life-super@yandex.ru; phone: +79043464554; the department of high mathematic; graduate.

Rumilova Svetlana Yur'evna – e-mail: svechqa@gmail.com; phone: +79525821572; the department of high mathematic; graduate.

УДК 519.86

А.Е. Чистяков, Д.С. Хачунц

**ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ДВУМЕРНОЙ ЗАДАЧИ ДВИЖЕНИЯ
ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ**

Работа посвящена построению двумерной математической модели движения воздушной среды, а также написанию программного комплекса, реализующего разработанные алгоритмы. Для адекватного математического описания процессов, происходящих в атмосфере, требуется решить проблему построения ее физической модели, поскольку она существенным образом влияет на построение поля ветра и на описание переноса, происходящего в воздушной среде. Физические свойства атмосферного воздуха (температура, влажность, подвижность, атмосферное давление) нестабильны и связаны с климатическими особенностями географического региона. В работе представлена аппроксимация задачи по временной переменной, построена двумерная модель аэродинамики и приведены результаты численных экспериментов.

Воздушная среда; двумерная математическая модель; аппроксимация; аэродинамика.

A.E. Chistyakov, D.S. Khachunts

PROGRAM REALIZATION OF AIR MOTION TWO-DIMENSIONAL TASK

This work is dedicated to two-dimensional mathematic model constructing and creating of program complex for the developed algorithms realization. In order to adequately make mathematical description of processes occurring in the atmosphere the problem of constructing a physical model of atmosphere should be solved since it significantly affects the construction of the wind field and transfer description occurring in the air. Physical features of air (temperature, humidity, changeability, atmosphere pressure) are unstable and connected with climatic characteristics of geographical region. In this work the approximation of the time variable problem is presented, two-dimensional aerodynamic model is constructed and the results of numerical experiments are given.

Air; two-dimensional mathematical model; approximation; aerodynamics.

Введение. В общем перечне актуальных задач, решаемых с помощью математического моделирования, состояние воздушной среды занимает особое место. Естественным средством объективного анализа возникающих проблем являются методы, основанные на построении и совместном изучении математических моделей природных систем. Использование математического моделирования и проведение вычислительного эксперимента позволяют оценить все аспекты реализации проектов, связанных с воздействием на природную среду. Одним из наиболее значимых исследования методов климата и динамики атмосферы является проведение численных экспериментов. Современные численные методы позволяют осуществить моделирование объектов, поведение которых описывается весьма сложными системами дифференциальных уравнений.

1. Постановка задачи. Основными уравнениями динамики воздушной среды являются [1–8]:

– система уравнений Навье–Стокса