

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА КОНЦЕНТРАЦИЙ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ВЫБРОСОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ В РАЙОНЕ АЭРОПОРТА

Ю.В. Медведев  
МГУ им. М.В. Ломоносова

В статье приводится краткое описание основных характеристик и возможностей разработанной методики для расчета концентраций загрязняющих веществ от выбросов двигателей воздушных судов в районе аэропорта. Проведен сравнительный анализ с аналогичными методиками, применяемыми в данное время на территории Российской Федерации и других стран. Указывается на отличия в математическом и вычислительном подходах, а также на ряд особенностей, характерных исключительно для данной методики. В заключении, приведено несколько графических иллюстраций результатов вычислений.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

При проведении жилищного строительства в районе аэропорта наряду с другими ограничительными факторами необходимо учитывать и ограничения, обусловленные вредным воздействием воздушных судов (ВС) на окружающую среду. Источниками такого воздействия являются шум и вредные выбросы. К загрязняющим веществам (ЗВ), содержащимся в выхлопных газах авиадвигателей, относятся:

- оксиды углерода  $\text{CO}$ ;
- несгоревшие углеводороды  $\text{CH}$ ;
- оксиды азота  $\text{NO}_x(\text{NO}, \text{NO}_2)$ ;
- оксиды серы  $\text{SO}_x$ .

Наличие концентрационных ограничений является фактором, определяющим минимальное расстояние зоны жилой застройки от направления взлета и посадки ВС в зоне аэропорта. Это минимальное расстояние должно быть определено для случая наиболее неблагоприятной ситуации, т.е. наибольшей интенсивности воздушного движения, когда масса выбросов ЗВ становится максимальной.

Введенная в действие в 1992 г. и используемая по настоящее время «Методика контроля загрязнения атмосферного воздуха в окрестностях аэропорта» имеет ряд существенных недостатков и ошибок, приводящих в итоге к значительным завышениям уровней концентрации ЗВ, искажениям в их распределении, а следовательно, и к неверному определению границ санитарно-защитной зоны (СЗЗ) аэропорта.

С учетом изложенного для определения гра-

ниц СЗЗ представляется актуальной разработка методики расчета концентраций ЗВ, наиболее удачно соответствующей современным условиям функционирования воздушного транспорта.

Распространение загрязняющих веществ, содержащихся в струе выхлопных газов авиадвигателя, происходит в воздухе, как за счет диффузии, так и за счет турбулентного смешения, возникающего при взаимодействии струи с окружающим воздухом. Поэтому в основу методики заложена модель распространения примеси ЗВ от точечного движущегося источника за счет атмосферной диффузии и ветра. В качестве модельного выбрано уравнение переноса с постоянными коэффициентами атмосферной турбулентной диффузии:

$$\frac{dc}{dt} + u_b \frac{dc}{dx} = k_x \frac{d^2c}{dx^2} + k_y \frac{d^2c}{dy^2} + k_z \frac{d^2c}{dz^2}$$

где  $c$  - концентрация примеси;  $u_b$  - скорость ветра;  $k_x, k_y, k_z$  - коэффициенты турбулентной диффузии.

При создании методики делался акцент на учет наиболее возможного количества параметров рассматриваемой задачи. Был рассмотрен весь цикл рассеивания ЗВ: от выброса посредством реактивной струи двигателя ВС до рассеивания образовавшегося облака ЗВ в атмосфере. Производится учет не только режимов работы двигателей ВС с соответствующими различными по составу выбросами ЗВ, но и их компоновка (количество и расположение двигателей на ВС). Маршруты движения судов вместе со стоянками для прогрева двигателей также приняты во внимание. Метеорологические условия, такие как скорость и направление ветра, температура, атмосферное давление, вносят свой вклад в результат численного счета.

В силу выбранной модели методика позволяет рассчитывать не только выбросы от ВС и других движущихся в пространстве источников ЗВ, но и рассчитывать концентрации ЗВ вблизи стационарных источников различной природы. Полученные значения концентраций используются стандартным образом при определении границ СЗЗ.

В настоящее время известны несколько мето-

дик [1-3 и др.] расчета концентраций загрязняющих веществ (ЗВ) от различных транспортных и промышленных источников. Для расчета концентраций выбросов ЗВ от двигателей воздушных судов используется методика [1]. Эта методика имеет под собой более сложную структуру в отличие от методик [2,3], но, к сожалению, одним из самых главных ее минусов является метод расчета с использованием фиктивного источника ЗВ. В данном случае используются полуэмпирические формулы для определения положения фиктивного источника без какого-либо учета экранного эффекта ВПП и взаимодействия реак-

тивных струй с атмосферным воздухом.

Методика [2] EDMS (Emissions and Dispersion Modeling System), созданная CSSI Incorporated, представляет собой американский аналог ОНД-86 [3], но, безусловно, более высокого уровня, поскольку предоставляется постоянная техническая поддержка в совокупности с обновлениями и обширными руководствами пользователя. Тем не менее, в основе программного продукта, несмотря на удобный интерфейс и возможность учета стационарных и движущихся источников ЗВ, лежит следующее частное решение уравнения турбулентной диффузии:

$$c(x,y,z,H) = \frac{M}{2\pi k_y k_z u} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{k_y}\right)^2\right] \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{k_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{k_z}\right)^2\right] \right\} \quad (1)$$

Очевидно, в приведенное решение временная координата не входит, а значит, рассматривается стационарная задача и из рассмотрения упускаются эффекты, характерные для нестационарных процессов: затухание реактивной струи, всплытие облака ЗВ под действием разности давлений и рассеивание примесей ЗВ с течением времени.

Таким образом, методика EDMS, более адекватна в приложении к движущимся источникам ЗВ, хотя и не учитывает всех факторов рассеивания примесей и процессов взаимодействия реактивной струи с окружающей атмосферой. Основное внимание разработчиками было уделено удобному взаимодействию пользователя с программой расчета.

Ввиду малой эффективности численных методов и недостаточности вычислительных ресурсов на момент разработки, методика ОНД-86 имеет определенную последовательность полуэмпирических формул. Научное обоснование полученных соотношений достаточно неясно и, по сути, остается скрытым. Дальнейший анализ в целях улучшения методики не представляется возможным. Но наиболее негативным в плане применимости к движущимся источникам ЗВ, в частности ВС, является тот факт, что методика ОНД-86 разрабатывалась для стационарных источников ЗВ и поэтому не учитывает множество факторов, таких как экраный эффект ВПП, торможение реактивной струи двигателей ВС внешней атмосферой, компоновку двигателей на ВС и другие.

На данном этапе развития вычислительных методов возможно значительное увеличение

диапазона учитываемых параметров задачи и более эффективный расчет полей концентраций ЗВ в районе аэропорта. При этом затраты на вычисление минимальны и не превышают 15 минут.

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

2.1. Моделирование распространения примеси ЗВ от точечного источника под действием атмосферной диффузии и ветра

В основу методики заложена модель распространения примеси ЗВ от точечного движущегося источника за счет атмосферной диффузии и ветра. В качестве модельного выбрано уравнение переноса с постоянными коэффициентами атмосферной турбулентной диффузии:

$$\frac{dc}{dt} + u_b \frac{dc}{dt} = k_x \frac{d^2c}{dx^2} + k_y \frac{d^2c}{dy^2} + k_z \frac{d^2c}{dz^2} \quad (2)$$

где  $c$  - концентрация примеси;  $u_b$  - скорость ветра;  $k_x, k_y, k_z$  - коэффициенты турбулентной диффузии.

Примеси считаются химически неактивными (что соответствует действительности), и поэтому источники члены в исходном уравнении отсутствуют. Система координат выбрана таким образом, чтобы в левой части уравнения было меньше конвективных членов: на точность модели это не влияет, но позволяет сократить время численного счета.

Аналитическое частное решение модельного уравнения известно и имеет следующий вид:

$$c(x,y,z,t) = \frac{M}{4(\pi t)^{3/2} \sqrt{k_x k_y k_z}} \exp\left(-\frac{(x-x_0-u_0 t)^2}{4k_x t} - \frac{(y-y_0)^2}{4k_y t}\right) \times \left[ \exp\left(-\frac{(z-z_0-H)^2}{4k_z t}\right) + \exp\left(-\frac{(z+z_0+H)^2}{4k_z t}\right) \right] \quad (3)$$

Здесь приняты следующие обозначения:  $M$  (г/с) – залповый выброс массы ЗВ за единицу времени работы двигателей ВС;  $H$  – высота всплывания облака ЗВ (об определении этого параметра будет подробнее сказано ниже);  $(x_0, y_0, z_0)$  – текущие координаты ВС относительно введенной системы отсчета.

Последняя формула позволяет рассчитать поле концентраций для любой точки рассматриваемой области в любой момент времени для залпового источника. Для получения осредненной концентрации необходимо произвести осреднение по времени путем интегрирования и последующего деления на диапазон интегрирования. Очевидно, осреднение можно проводить по различным масштабам времени: для разовых концентраций достаточно положить  $T = 1800$  сек, для среднесуточной концентрации соответственно принимаем  $T = 43200$  сек.

Далее, для определения суммарной концентрации ЗВ от одного ВС следует суммировать соответствующие средние концентрации от всех залпов, эти же концентрации дают полную картину поля концентраций на рассматриваемой территории. Аналогично концентрации суммируются при наличии двух и более ВС путем сложения соответствующих компонент загрязнения.

Количество залпов от ВС определяется выбранной дискретизацией по времени, а сам шаг разбиения может принимать различные значения: уменьшаться при интенсивной работе двигателей ВС и быстром движении последнего и увеличиваться при рулении и других промежуточных действиях. В простейшем случае при прогреве двигателей (ВС неподвижно) можно без потери точности рассмотреть эту часть ВПЦ в качестве одного залпа с соответствующими корректировками формульных констант.

Сразу следует оговориться, что, несмотря на то, что коэффициенты атмосферной турбулентной диффузии в модельном уравнении полагаются постоянными, это несколько не уменьшает эффективность решения поставленной задачи. Суть метода заключается в том, что всю рассматриваемую область мы делим на подобласти, в каждой из которых значения указанных коэффициентов считаются кусочно-постоянными, и таким образом, имеет место указанное точное решение. Границы подобластей определяются, главным образом, режимом работы двигателей ВС, а также движением ВС (в том числе и по высоте, поскольку высота над поверхностью земли имеет достаточно сильное влияние на коэффициенты турбулентной диффузии).

Особого внимания требует описание принци-

па выбора значений коэффициентов атмосферной турбулентной диффузии в соответствующих подобластях. Этот раздел методики, равно как и в аналогичных методиках, является в некоторой степени элементом произвола. В других известных методиках [1-3] предлагается определять эти коэффициенты по неким полуэмпирическим формулам. В целом такой подход приемлем, но в этом случае точность и адекватность модели ставятся под сомнение.

Есть иной способ: начальные значения выбираются довольно произвольно в пределах некоторого адекватного диапазона и могут быть взяты в качестве исходных из аналогичных методик. Затем производится численный эксперимент, и его результаты сравниваются с несколькими заборами проб воздуха. Таким образом, при наличии расхождений в результатах возможны несколько вариантов: во-первых, можно произвести более подробное разбиение исходной области на подобласти; во-вторых, можно варьировать значения коэффициентов атмосферной турбулентной диффузии в тех областях, где наблюдаются отклонения результатов численного счета от фактических замеров; в-третьих, можно изменить дискретизацию по времени как в сторону увеличения точности результатов, тем самым, увеличив время работы программы, так и в обратную сторону (эффективно при нахождении подходящих значений коэффициентов на начальном этапе адаптации метода к конкретной территории).

## 2.2. Моделирование процесса переноса ЗВ выхлопной струей двигателя

При моделировании процесса переноса ЗВ выхлопной струей двигателя рассматривается несколько аспектов задачи. В первую очередь необходимо определиться с нахождением параметра  $H$  – высотой всплывания облака ЗВ, о которой упоминалось вначале. На значение этого параметра влияет, главным образом, экранный эффект поверхности ВПП, который в методике [1] просто не учитывается. Также для адекватного решения задачи необходимо определить характерное расстояние, на котором скорость струи и скорость ветра имеют если не равные, то вполне сравнимые значения.

Для нахождения указанных величин достаточно решить вспомогательную двумерную подзадачу полужатопленной струи нагретого газа с турбулентным смешением. Схематическое изображение подзадачи представлено на рисунке 1.

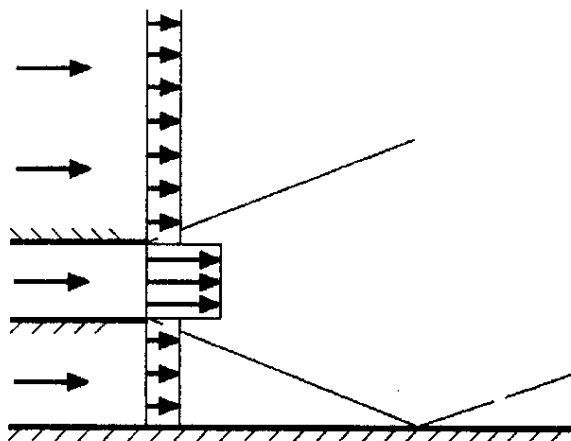


Рис. 1. Схема рассматриваемой подзадачи полужатопленной струи

В начальном сечении подается нагретый газ, который впоследствии смешивается с холодным газом окружающей среды: начальная струя расширяется, охлаждается и затухает. Помимо начальных условий задаются граничные условия: на твердой нижней стенке должно выполняться условие прилипания ( $u|_{n=0} = 0$ ;  $v|_{n=0} = 0$ ) и на верхней границе – на бесконечности (в численной реализации бесконечность заменяется достаточно удаленной границей  $H^*$ ) – задается условие выравнивания ( $u|_{n=H^*} = u_\infty$ ;  $v|_{n=H^*} = 0$ ).

Избегая излишнего углубления в метод решения задачи, опишем лишь основные моменты в ее постановке и решении. Для описания движения газа используются уравнения неразрывности, сохранения количества движения, температуры, концентрации и уравнение состояния среды:

$$\frac{dp}{dt} + \frac{d(pU)}{dx_i} = 0;$$

$$\frac{dU_i}{dt} + U_j \frac{dU_i}{dx_j} = \frac{1}{p} \frac{dp}{dx_i} + \frac{1}{p} \frac{d(-p\bar{u}_i u_j)}{dx_j} + g_i;$$

$$\frac{d\Phi}{dt} + U_j \frac{d\Phi}{dx_j} = \frac{1}{p} \frac{d(-p\bar{u}_i \Phi)}{dx_j} + S_\Phi;$$

$$p = p(\Phi);$$

Здесь введены следующие обозначения:  $\Phi, \phi$  – соответственно средняя и пульсационная составляющая скалярной величины (которой может являться как концентрация, так и температура);  $S_\Phi$  – это объемная плотность источников, характеризующая, например, приращение или убыль соответствующей скалярной величины за счёт химических реакций.

Разумеется, сделаны упрощения ввиду двумерности задачи, а также в уравнениях сохране-

ния количества движения и температуры опущены члены молекулярного переноса. Это сделано из следующих соображений: для процессов, характеризующихся большими числами Рейнольдса (а именно такие процессы соответствуют рассматриваемой тематике), во всей области за исключением зон, примыкающих к стенкам, указанные члены пренебрежимо малы по сравнению с их турбулентными аналогами. Массовыми силами также пренебрегаем.

Что же касается вязкого пограничного слоя, то в такой постановке задачи он не рассматривается, так как его влияние проявляется лишь в достаточно малой области около поверхности земли и не вносит существенных изменений в структуру всего течения, в отличие от турбулентной вязкости.

В силу стационарности рассматриваемой подзадачи частные производные по времени в исходных уравнениях отсутствуют. Массовыми силами также пренебрегаем, поэтому исходная система значительно упрощается.

Поскольку задача двумерна и стационарна, то численное решение ее не представляет большой сложности. Из решения этой подзадачи определяются недостающие параметры для решения модельного уравнения:  $H$  – высота всплывания облака ЗВ, а также характерное время затухания струи.

### 2. 3. Параметризация траектории движения ВС. Блок-схема решения

Поскольку возможна различная по точности дискретизация траектории движения ВС, а сама траектория представляет собой кусочно-гладкую кривую в трехмерном пространстве, то наиболее целесообразно параметризовать данную кривую, введя в качестве параметра время от начала взлетно-посадочного цикла. Таким образом, для каждого момента времени можно определить положение ВС в пространстве и полученные координаты использовать для нахождения поля концентрации ЗВ по указанной выше формуле 2.

Ниже представлена блок-схема программы вычислений поля концентраций ЗВ при эксплуатации ВС (рис. 2). Численное моделирование поставленной в данной методике задачи не представляет особых сложностей, и все модули программы имеют четкую структуру. В данной реализации программа написана на языке C/C++, поскольку в процессе вычислений важную часть занимает работа с памятью. В дальнейшем возможна реализация на Visual C для создания более дружественного интерфейса в отличие от консольного приложения.

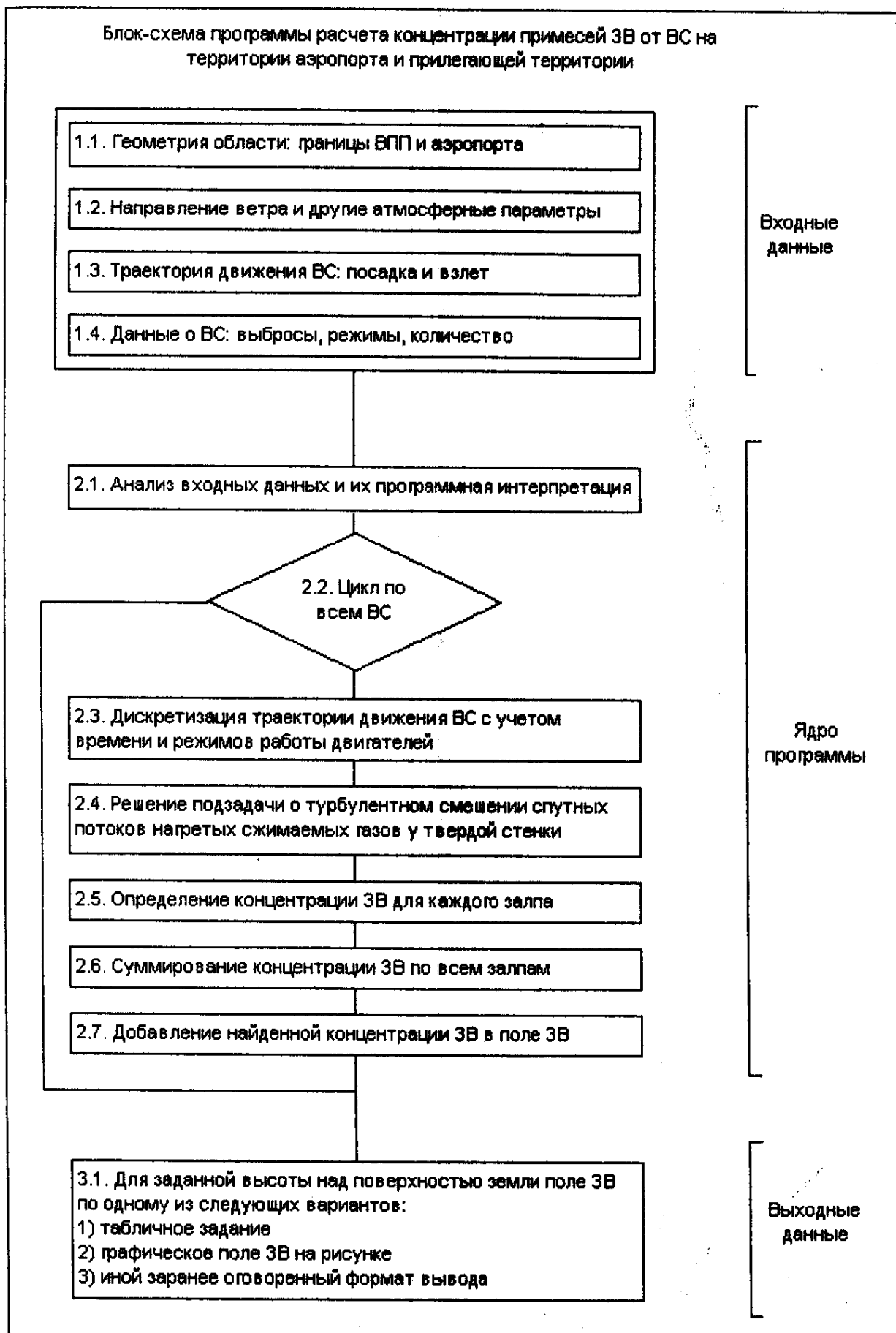


Рис. 2. Блок-схема программы вычислений по данной методике

### 3. ПРИМЕР ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВ ОТ ЗАЛПОВОГО ИСТОЧНИКА

В качестве демонстрации возможностей методики представлены результаты численного счета поля концентраций ЗВ от залпового источника (качественная картина). На рисунке 3 изображено поле концентраций ЗВ с учетом бокового ветра; градиентом цвета от синего к красному указан рост концентрации ЗВ.

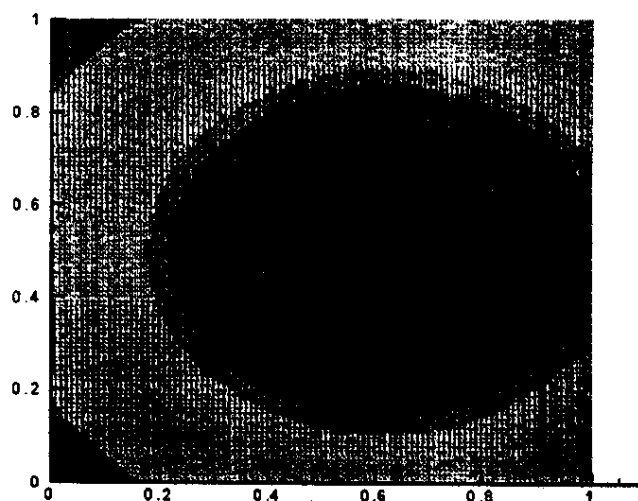


Рис. 3. Качественная картина поля концентрации ЗВ от залпового источника

В трехмерном изображении поле концентрации ЗВ имеет вид, показанный на рисунке 4. Гладкость полученного частного решения для модельного уравнения переноса способствует адекватности методики, исключая возможность возникновения нефизичных по своей природе разрывов и зон с резко меняющимися значениями концентраций.

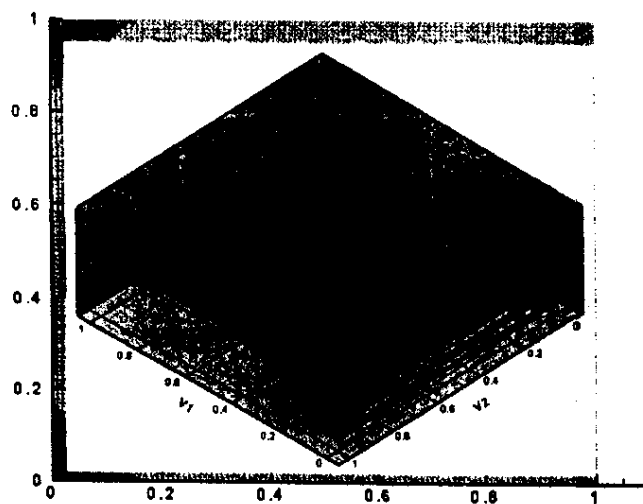


Рис. 4. w

### 4. ВОЗМОЖНОСТИ РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ

О моделях, методах и численной реализации предлагаемой методики уже было изложено выше, поэтому, резюмируя сказанное, отметим лишь ее основные черты и возможности. При составлении методики в первую очередь делался акцент на учет наиболее возможного количества параметров рассматриваемой задачи.

В связи с этим был рассмотрен весь цикл рассеивания ЗВ: от выброса посредством реактивной струи двигателя ВС до рассеивания образовавшегося облака ЗВ в атмосфере. Производился учет не только режимов работы двигателей ВС с соответствующими различными по составу выбросами ЗВ, но и их компоновка (количество и расположение двигателей на ВС). Маршруты движения судов вместе со стоянками для прогрева двигателей также приняты во внимание. Метеорологические условия, такие как скорость и направление ветра, температура, атмосферное давление, вносят свой вклад в результат численного счета.

В качестве модели рассеивания выбрана наиболее полная и разносторонняя, учитывающая нестационарность процесса и допускающая различные значения коэффициентов турбулентной диффузии по всем трем направлениям системы координат. Дискретизация расчетной области вводится для возможности учета изменения коэффициентов турбулентной диффузии. В первую очередь это обусловлено тем, что с изменением высоты значения этих коэффициентов изменяются довольно значительно и могут считаться постоянными лишь в малой области в то время как реальные физические процессы имеют значительно более сложную структуру и не могут быть всецело приняты во внимание в связи с тем, что масштабы рассматриваемой задачи велики и время работы программы по расчету будет необоснованно большим.

Возможен также учет влияния различных строений и иных наземных объектов на процесс рассеивания примесей ЗВ путем введения дополнительных подобластей и использования соответствующей дискретизации с введением модифицированных коэффициентов турбулентной диффузии. (Решение полной задачи об обтекании и рассеивании даже в стационарной постановке неприемлемо из-за ее сложности в смысле компьютерной реализации и затрат времени.)

Помимо указанных выше преимуществ у предлагаемой методики есть еще одна интересная особенность. В силу выбранной модели данная методика позволяет рассчитывать не только вы

бросы от ВС и других движущихся в пространстве источников ЗВ, но и рассчитывать концентрации ЗВ вблизи стационарных источников различной природы (в том числе с переменными по времени выбросами: от котельных и хранилищ ГСМ до автостоянок). Дело в том, что уравнение турбулентной диффузии охватывает широкий спектр задач и имеет наиболее общий вид, позволяя закладывать специфику определенной задачи в значения входящих в уравнение коэффициентов, а также в значения параметров, входящих в приведенное решение.

Более того, для расчета поля концентраций ЗВ на прилегающей территории от стационарных источников задача заметно упрощается, поскольку отпадает необходимость отыскания высоты, с которой начинается рассеивание ЗВ (здесь она изначально известна). Также не нужно определять траекторию и проводить ее дискретизацию, выполнять сложные расчеты по разбиению области на подобласти и в каждой из них определять значения коэффициентов турбулентной диффузии. В программной реализации эти упрощения сво-

дятся к замене определенных блоков программы на более простые и не требующие практически никакого вычислительного времени.

Таким образом, разработанная методика расчета концентраций ЗВ имеет широкий спектр применения и большой потенциал для дальнейшего развития и улучшения.

#### Список литературы

1. Министерство транспорта России, ГосНИИ ГА. Методика контроля загрязнения атмосферного воздуха в окрестностях аэропорта. М., 1992, 58 с.

2. Isaacson, D. R., Robinson III, J. E., August 2001, "A Knowledge-Based Conflict Resolution Algorithm for Terminal Area Air Traffic Control Advisory Generation", AIAA 2001-4116, Guidance, Navigation, and Control Conference, Montreal, Canada.

3. «Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий» (ОНД-86).

## АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ШУМА НА ЗДОРОВЬЕ НАСЕЛЕНИЯ

**С.И. Иванов, С.М. Черненко**

*ГУ НИИ ЭЧ и ГОС им. А.Н. Сысина РАМН, г. Москва*

Согласно материалам Государственного доклада «О санитарно-эпидемиологической обстановке в Российской Федерации в 2005 году», по числу жалоб населения важное место среди физических факторов неионизирующей природы занимает акустический шум. Среди физических факторов окружающей среды, играющих значимую роль в создании благоприятной среды обитания, акустический шум сопоставим с такими факторами, как вибрация и электромагнитные поля.

Акустический шум и вибрация являются одной из главных причин хронических профессиональных заболеваний в ряде субъектов Российской Федерации (г. Москва, Республика Татарстан, Ростовская обл. и др.). В то же время, несмотря на безусловную значимость шума как производственного, профессионального фактора вредности, необходимо помнить, что он влияет на население повсеместно. Акустическая обстановка, зашумленность территорий населенных пунктов и городов, через которые пролегают крупные транспортные линии, с каждым годом остается неблагоприятной. Не соответствующие норми-

руемым значения уровня шума на территориях жилого фонда в таких городах, как Москва и Санкт-Петербург, составляют порядка 50-60% от общей площади.

В среднем за период с 2001 по 2005 годы процент неблагоприятных с гигиенической точки зрения объектов-источников шума в населенных пунктах дополнительно вырос за счет ухудшения обстановки в районе автомагистралей. Перспектива в отношении этого фактора не выглядит благоприятной, за счет отсутствия регулярного контроля уровня шума от транспорта на территории населенных пунктов.

Сверхнормативному воздействию шума в России подвергаются свыше 10 млн человек, для которых шум стал неотъемлемой частью повседневной жизни. Одна из проблем заключается в том, что многие люди воспринимают излишний шум всего лишь как досадное неудобство, а не как серьезную опасность для здоровья, в то же время уже давно получены результаты, демонстрирующие губительное воздействие шума на организм: снижение остроты слуха, стресс, приводящий к бессоннице, высокому кровяному