

Г. Н. Заурбекова /к. т. н./

КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

Моделирование загрязнения атмосферы промышленными выбросами

В разработанной информационной системе используется широкий спектр математических моделей и прикладных программ переноса и рассеивания вредных веществ при реальных атмосферных процессах; математические модели, блок-схемы и прикладные программы процесса переноса загрязняющих веществ в пограничном слое атмосферы с незакрепленной верхней границей; математические модели, блок-схемы и прикладные программы процесса переноса вредных примесей в приземном слое атмосферы с учетом нижней границы инверсии; численные модели нижних (пограничного и приземного) слоев атмосферы. Проведены вычислительные экспериментальные расчеты на компьютере для создания методов прогнозирования коррекции и управления экологической ситуацией в регионе технополиса. (Ил. 8. Библиогр.: 12 назв.)

Ключевые слова: атмосферные процессы, загрязнения атмосферы, пограничный слой атмосферы, приземной слой атмосферы, математическое моделирование загрязнения атмосферы, информационные системы мониторинга экологической обстановки.

The developed information system uses a wide range of mathematical models and application programs of transfer and dispersion of harmful substances at real atmospheric processes; mathematical models, flowcharts and application programs of process of transfer of the polluting substances in atmospheric boundary layer with loose upper bound; mathematical models, flowcharts and application programs of process of transfer of harmful impurities in a ground layer of the atmosphere taking into account the lower bound of inversion; numerical models of lower (boundary and ground) atmosphere layers are also carried out computing experimental calculations on the computer for creation of methods of correction, management and forecasting of ecological situation of technopolis region.

Key words: atmospheric processes, pollution of atmosphere, atmospheric boundary layer, ground layer of atmosphere, mathematical modeling of atmosphere pollution, information systems of ecological situation monitoring.

Для исследования локальных атмосферных процессов, происходящих в пограничном слое, используем математическую модель, основанную на системе уравнений гидротермодинамики. Вследствие сравнительно небольших горизонтальных масштабов (50×50 км) рассматриваемых мезометеорологических процессов систему уравнений гидротермодинамики запишем в декартовой системе координат x, y, z . В качестве исходных взяты следующие уравнения: движения, неразрывности, состояния, притока тепла, удельной влажности, в которых участвуют искомые функции: вектор скорости, температура, потенциальная температура, давление, плотность, удельная влажность, тензор вязких напряжений потока, тепла и влаги, являющиеся функциями координат и времени, полученными для реальных атмосферных процессов.

В конкретных видах потоки тепла и влаги, тензора вязких напряжений, состояния среды участвуют универсальная газовая постоянная, скрытая теплота конденсации, удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении, радиационная составляющая притока тепла, термический эквивалент работы, ускорение свободного падения, параметр Кориолиса, ско-

рость образования жидкой фазы, определенная с точностью до турбулентных членов, выраженная через сухоадиабатический и влажноадиабатический градиенты.

Для того чтобы получить согласованную систему для локальных атмосферных движений, метеорологические поля представим в виде суммы фоновых значений поля и их отклонений от фоновых значений.

Подставляя в исходные уравнения значения метеорологических полей, вычитая из получившихся уравнений соответствующие уравнения для фоновых полей, получим исходную систему уравнений локальных атмосферных процессов. Полагая, что фоновые поля с точностью до малых слагаемых удовлетворяли исходные системы и пространственно-временные колебания плотности незначительно, получим окончательную систему уравнений в возмущениях, где участвуют параметры конвекции, а также вертикальный градиент стандартной атмосферы и горизонтальные градиенты фоновой потенциальной температуры и удельной влажности.

Рассмотрим совместные модели динамики пограничного слоя атмосферы во взаимодействии с термически и орографически неод-

нородной подстилающей поверхностью. Для суши – это модель температурного режима почвы с уравнением баланса тепла на границе с атмосферой и модель влагообмена. Распределение температуры в почве описывается известным уравнением. В качестве условий на поверхности земли примем уравнение баланса тепла. Как известно, температура приземного воздуха и суммарного испарения увлажненной поверхности зависят от инсоляции поверхности. Различия в инсоляции склонов в зависимости от их экспозиций могут привести в условиях орографической неоднородности подстилающей поверхности к значительным мезометеорологическим контрастам. Поэтому для расчета потока солнечной радиации на поверхности склона используем ненормированную формулу из работы М. И. Будыка. Во многих моделях динамики атмосферы для нахождения температуры почвы используются уравнения теплового баланса. Теплофизические характеристики почвы разнообразны, в результате чего даже на небольших расстояниях температуры над различными типами почвы резко различаются и тем самым влияют на динамику атмосферы в нижних слоях.

Решение системы уравнений гидродинамики при постоянном коэффициенте турбулентного обмена или турбулентной вязкости, показывает, что оно согласуется с некоторыми физически ясными свойствами интересующего нас течения, даже если толщину пограничного слоя рассматривать как заданный внешний параметр. Недостаток решения заключается в том, что из него следует пропорциональность сдвига ветра к сдвигу скорости геометрического ветра при сколь угодно больших значениях коэффициента турбулентного обмена. Для замыкания системы уравнений пограничного слоя атмосферы относительно вертикальных коэффициентов диффузии применяем метод, основанный на решении уравнения баланса турбулентной энергии. Операторы горизонтального турбулентного обмена рассчитывались через тензоры вязких напряжений.

Необходимость использования различных подходов для описания вертикального и горизонтального турбулентного обмена связана с тем, что в уравнении баланса турбулентной энергии учитывается температурная стратификация атмосферы, что особенно важно для вертикального обмена. В природе при большой относительной влажности образуется облачность, в результате чего, в некоторых локальных областях, расположенных в верхних слоях атмосферы из-за выделения дополнительного притока тепла за счет конденсации, изменяется стра-

тификация атмосферы. Наблюдения над мезопроцессами, горизонтальные размеры которых несколько десятков километров, показывают, что они сопровождаются образованием облаков с горизонтальными размерами 5–10 км и вертикальными около 1,5–2,5 км. В связи с этим необходим учет фазовых переходов влаги.

В данном случае система уравнений пограничного слоя атмосферы с начальными и краевыми условиями решается с учетом члена образования жидкой фазы и дополняется уравнением переноса и диффузии для удельной влажности. Для численного моделирования гидрометеорологического режима промышленных районов необходимо иметь в качестве начальных данных значения метеоэлементов в узлах регулярной сетки. А измерения производятся на метеостанциях, размещенных по территории крайне неравномерно. Поэтому возникает задача восстановления значений метеоэлементов на узлах сеточной области по их значениям на станциях. Вопрос о восстановлении структуры полей гидрометеоэлементов будет выполнен аналогично работе В. В. Пененко. Известно, что степень загрязнения нижних слоев атмосферы вредными веществами зависит не только от технологических и конструктивных параметров источников загрязнения, но и от ряда метеорологических факторов, которые определяют процесс распространения примесей в пограничном слое атмосферы. Этими факторами являются скорость ветра, термическая стратификация, орографика местности, характер подстилающей поверхности и т. д. Поэтому для более полного описания процессов переноса диффузии и трансформации примесей их необходимо рассматривать на базе физически достаточно богатой модели, учитывающей, по крайней мере, суточный ход изменчивости рассеяния в зависимости от метеорологических ситуаций, орографических и термических неоднородностей подстилающей поверхности. С этой целью модель динамики пограничного слоя атмосферы, дополним математической моделью переноса и трансформации примесей. Далее они решаются совместно.

Анализируем некоторые результаты вычислений. Например, (рис. 1) изолинии реализует вариант с различными уровнями наблюдения ($Z_1 = 10$ м, $Z_2 = 100$ м). В верхних слоях атмосферы с увеличением высоты увеличиваются скорость ветра, размер вихрей, обслуживающий турбулентный обмен, что приводит к большому распространению загрязняющих примесей. Как уже указывалось, в силу поставленных условий расчета, выделить изолинии уровня единиц ПДК нет возможности (уровень 7).

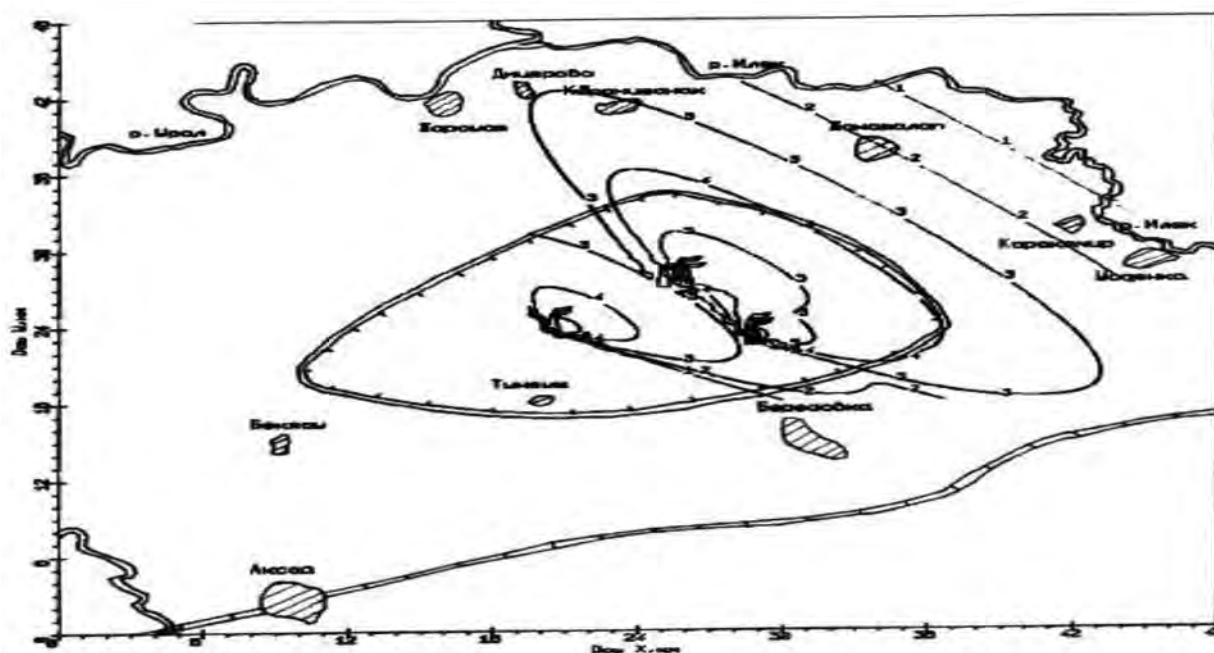


Рис. 1. Изолинии распределения концентрации CO_2 на высоте 100 м

Произведены расчеты рассеивания вредных веществ, содержащихся в продуктах сгорания газа на открытой факельной установке. Построены геоэкологические карты распространения примесей с применением гидродинамической модели пограничного слоя атмосферы. С ростом числа и мощности нефтегазодобывающих месторождений резко возрастает опасность того, что концентрация вредных веществ, поступающих в нижние слои атмосферы, может превышать предельно допустимые величины. Совершенно очевидно, что степень загрязнения нижних слоев атмосферы зависит не только от технологических и конструктивных параметров промышленных объектов (таких как мощность выброса, высота и диаметр труб, скорость переноса и температура выбрасываемых в воздух веществ и др.), но и от тех факторов, которые определяют процесс распространения примесей в атмосфере. Этими факторами являются скорость ветра, стратификация атмосферы, орография местности и характер подстилающей поверхности. Они обуславливают скорость переноса вредных веществ вдоль направления среднего ветра и интенсивность турбулентного перемешивания. Приступая непосредственно к рассмотрению процессов распространения примесей, следует иметь в виду, что в подавляющем большинстве случаев они протекают в пределах пограничного слоя атмосферы. Поэтому представление о структуре последнего, в частности о динамике пограничного слоя, и уравнения переноса и диффузии примеси лежат в основе излагаемых ниже численных расчетов.

Математическое моделирование пограничного слоя атмосферы со свободной верхней границей воздушной массы. При математическом моделировании пограничного слоя атмосферы со свободной верхней границей воздушной массы нами разработаны основные математические модели движения гидротеродинамического режима реальных атмосферных процессов. Модели разработаны с учетом механизма фазовых переходов воды, процессов в планетарном пограничном слое, влияние радиационных и турбулентных переносов энергии, процессы конденсации, изменения термодинамического состояния неоднородной атмосферы, приводящие к существенному изменению циркуляции, геофизических свойств Земли и массовых сил вращения Земли и их неоднородности, а также орографии местности.

В работах [1-12]:

1. Получены модели притока тепла, являющегося важным фактором динамики бароклинных преобразований, изменения давления во влажной атмосфере и неадвективных изменений давления при отсутствии конденсации. Предложены прогностические модели сжимаемой атмосферы для определения осредненных метеорологических элементов.

2. Оценена роль турбулентной диффузии и горизонтального турбулентного переноса механической энергии (ϵ_p) в динамике циклона, особенно в конечной стадии развития.

3. Получены математические модели динамики вертикальных движений насыщенной и влажной ненасыщенной облачной атмосферы. Предложена численная схема изменений давле-

ний. Описаны вертикальные скорости и предложена модели и методика расчета вертикального движения в многослойной облачной атмосфере с учетом фронтальных поверхностей. Приведены примеры численного расчета вертикальных движений вблизи облаков.

4. Разработаны численные модели динамики атмосферы, получены основные модели атмосферной циркуляции и численная конечно-разностная схема бароклинных процессов атмосферы, а также модели краткосрочного прогноза бароклинных процессов атмосферы и предложена математическая модель стационарных атмосферных процессов.

5. Получены математические модели переноса и рассеивания вредных веществ в реальной атмосфере при переменном профиле скорости.

Для исследования локальных атмосферных процессов, происходящих в пограничном слое, используем математическую модель, основанную на системе уравнений гидротермодинамики. Вследствие сравнительно небольших горизонтальных масштабов (50×50 км) рассматриваемых мезометеорологических процессов систему уравнений гидротермодинамики запишем в декартовой системе координат x, y, z . В качестве исходных взяты следующие уравнения: движения, неразрывности, состояния, притока тепла, удельной влажности, в которых участвуют искомые функции: вектор скорости, температура, потенциальная температура, давление, плотность, удельная влажность, тензор вязких напряжений потока, тепла и влаги, являющиеся функциями координат и времени, полученными в [3; 4] для реальных атмосферных процессов.

В конкретных видах потоки тепла и влаги, тензора вязких напряжений, состояния среды участвуют универсальная газовая постоянная, скрытая теплота конденсации, удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении, радиационная составляющая притока тепла, термический эквивалент работы, ускорение свободного падения, параметр Кориолиса, скорость образования жидкой фазы, определенная с точностью до турбулентных членов, выраженная через сухоадиабатический и влажноадиабатический градиенты.

Одним из важных аспектов в решении задач пограничного слоя атмосферы является постановка математически корректных и физически непротиворечивых начальных и краевых условий для системы уравнений гидротермодинамики [6]. Постановка начальных и краевых условий во многом зависит от особенностей каждой конкретной обстановки. Поэтому рассмотрим некоторые общие замечания: начальные условия при $t = 0$ в моделях рассматриваемого типа

задаются по данным измерений и, таким образом, относятся к числу входных параметров. Однако на практике получение детальной физической информации о начальных мезомасштабных полях затруднительно. Поэтому для проведения численных расчетов для данного типа атмосферной циркуляции начальное поле возмущений считаем нулевым. В этом случае решение задачи при небольших значениях времени будет описывать адаптацию метеорологических полей к условиям, когда в процесс включается турбулентность.

Рассмотрим систему уравнений гидротермодинамики:

- движения:

$$\frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + lv + \frac{\partial \tau_{11}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{12}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{13}}{\partial z}; \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - lu + \frac{\partial \tau_{21}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{22}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{23}}{\partial z}; \quad (2)$$

$$\frac{dw}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g + \frac{\partial \tau_{31}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{32}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{33}}{\partial z}; \quad (3)$$

- неразрывности:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \text{div} \rho \vec{u} = 0; \quad (4)$$

- состояния (Клайперона):

$$p = \rho RT; \quad (5)$$

- притока тепла:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{L_w}{c_p} \Phi + Q_r + \frac{\partial H_1}{\partial x} + \frac{\partial H_2}{\partial y} + \frac{\partial H_3}{\partial z}; \quad (6)$$

- удельной влажности:

$$\frac{dq}{dt} = -\Phi + \frac{\partial Q_1}{\partial x} + \frac{\partial Q_2}{\partial y} + \frac{\partial Q_3}{\partial z}; \quad (7)$$

$$\theta = T \left(\frac{1000}{p} \right)^{\frac{AR}{c_p}}, \quad (8)$$

где $\frac{d\varphi}{dt} = \frac{\partial \varphi}{\partial t} + u \frac{\partial \varphi}{\partial x} + v \frac{\partial \varphi}{\partial y} + w \frac{\partial \varphi}{\partial z} \equiv \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \vec{U} \text{grad} \varphi$,

$\varphi = (u, v, w, \theta, q)$.

Скорость образования жидкой фазы Φ с точностью до турбулентных членов представим в виде [2]:

$$\Phi = i \frac{c_p}{L_w} (\gamma_a - \gamma_b) W; \quad i = \begin{cases} 1 & q \geq q_n \\ 0 & q < q_n \end{cases}, \quad (9)$$

где γ_a - сухоадиабатический градиент; γ_a, γ_b - влажноадиабатический градиент, который определяется формулой:

$$\gamma_b(P, T) = \gamma_a \frac{p + 0,622 \frac{L_w E}{RT}}{p + 0,622 \frac{L_w^2 E}{c_p R_n T^2}}, \quad (10)$$

где t – время; u, v, w – компоненты вектора скорости ветра в направлении декартовых координат x, y, z соответственно; T – температура; θ – потенциальная температура; p – давление; q – удельная влажность; ρ – плотность; R – универсальная газовая постоянная; L_w – скрытая теплота конденсации; c_p – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении; Q_r – радиационная составляющая притока тепла; A – термический эквивалент работы; g – ускорение свободного падения; l – параметр Кориолиса; $\tau_{i,j}$, ($i=1,3, j=1,3$) – тензор вязких напряжений Рейнольдса; $H_i, Q_i, i=1,3$ – потоки тепла и влаги в направлениях x, y, z соответственно.

Вид слагаемых $\tau_{i,j}, H_i, Q_i$ конкретизируем отдельно.

Систему уравнений (1–10) рассмотрим при следующих начальных и краевых условиях:

$$u' = 0, v' = 0, \theta' = 0, q' = 0, H(x, y) = H^0(x, y) \text{ при } t=0; \quad (11)$$

$$\frac{\partial u'}{\partial x} = 0, \frac{\partial v'}{\partial x} = 0, \frac{\partial \theta'}{\partial x} = 0, \frac{\partial q'}{\partial x} = 0 \text{ при } x = \pm X; \quad (12)$$

$$\frac{\partial u'}{\partial y} = 0, \frac{\partial v'}{\partial y} = 0, \frac{\partial \theta'}{\partial y} = 0, \frac{\partial q'}{\partial y} = 0 \text{ при } y = \pm Y; \quad (13)$$

$$u' = 0, v' = 0, \theta' = \alpha \Delta T, q' = 0, \pi' = 0, w' = \frac{dH}{dt} \text{ при } z = H(x, y, t); \quad (14)$$

$$u = 0, v = 0, \theta' = f(x, y, t), w = \frac{d\delta(x, y)}{dt}, q' = \tilde{Q}(x, y, t) \text{ при } z = \delta(x, y), \quad (15)$$

где $\Delta T = T_{\text{ТЕП}} - T_{\text{ХОЛ}}$, $H^0(x, y)$ – начальная заданная высота слоя инверсии.

Функции f, \tilde{Q} предполагаются заданными.

В данном случае мы будем иметь задачу о пограничном слое атмосферы при движении воздушной массы над термически и орографически неоднородной поверхностью со свободной верхней границей воздушной массы, которая учитывается в краевых условиях.

Построение геоэкологической карты переноса примесей с использованием модели пограничного слоя атмосферы с незакрепленной верхней границей воздушной массы. В атмосфере часто наблюдаются инверсионные ситуации, когда более теплая воздушная масса находится выше холодной. Эти воздушные массы отделяются свободной поверхностью $H(x, y, t)$, которая является искомой величиной. При этом можно предположить, что высота пограничного слоя атмосферы совпадает с нижней границей инверсии.

В отличие от постановки задачи пограничного слоя, где обычно верхняя граница имеет фиксированную высоту, в этом случае функция $H(x, y, t)$ является одной из искомым характеристик. Поэтому использование такой модели требует преобразования системы уравнений гидротермодинамики таким образом, чтобы в ходе решения задачи, наряду с другими метеоэлементами, определить функцию $H(x, y, t)$ и одновременно учитывать структуру рельефа подстилающей поверхности.

Расчеты также были проведены для наиболее аномальных метеоситуаций, т. е. когда в атмосфере преобладала конвекция, способствующая рассеиванию примесей, либо сильная инверсия, при которых может происходить накопление вредных веществ, превышающее предельно допустимые концентрации (ПДК). Во всех проведенных вариантах расчетов предполагалось, что примесь является однокомпонентной и пассивной.

Эффективная высота источников равнялась в среднем 50 м. При этом под высотой понимается сумма геометрической высоты трубы H и некоторой добавочной высоты. Последняя определяется подъемом облака примеси над срезом трубы, который обусловлен наличием первоначального количества движения в струе выходящих из трубы газов и их перегревом по отношению к атмосферному воздуху. Кроме того, расчеты приводились для двух компонентов выброса – двуокись азота (NO_2) и сернистого газа (SO_2), при этом их скорость оседания определялась по формуле Стокса. Фоновая метеоситуация выбрана, исходя из данных аэрологической станции и срочных наблюдений. Фоновая стратификация атмосферы определялась по средне-суточным градиентам температуры по вертикали до уровня 850 Мб.

Теперь рассмотрим один вариант выполненных расчетов, проведенных по гидродинамической модели рассеивания примесей в приземно-пограничном слое атмосферы в районе Карачаганакского нефтегазоконденсатного месторождения. Для этого была выбрана область размером 48 м², таким образом, чтобы источники расположились примерно в середине, и в последующем этот район был покрыт сеткой шагом 2000 м. Таким образом, расчеты выполнялись на сетке 24×24×18. Во всех случаях режим работы источников предполагался стационарным, т. е. $Q(t) = Q_0 = \text{const}$. Шаг интегрирования по времени – $\Delta t = 10$ мин. Для разного варианта вычислений затрачивалось разное количество времени.

Пример. В данном случае рассматривается результат численного моделирования рассеяния сернистого газа в условиях зимы. Фоно-

вые характеристики для модели заимствованы из результатов реальных наблюдений. В качестве фонового потока считать ветер на уровне 850 мб со значением $U_q = 5,1$ м/с; $V_q = 3,1$ м/с. На рис. 2 показаны изолинии распределения концентрации сернистого газа (SO_2) на уровне $Z = 2$ м в момент времени $t = 16^{00}$ ч. Отсюда следует, что концентрация в основном локализована в окрестности источников. Но в этом случае почти не наблюдается зона превышающая ПДК. Наибольшим значением, соответствующим изолинии с номером 7, является $0,0071$ мг/м³.

А теперь рассмотрим изолинии концентрации на уровне источника. В этом случае происходит накопление концентрации NO_2 в плоскости $z = 50$ м, где наблюдаются зоны, в которых примесь превышает нескольких десятков ПДК. Этот случай является типичным для высотных источников, когда в приземном слое устанавливается устойчивая инверсия температуры, вследствие радиационного выхолаживания. В данном варианте по модели были рассчитаны следующие характеристики метеоэлементов температуры почвы -27 °С, температура воздуха на уровнях $z = 2$ м и $z = 50$ м и, соответственно, 18 °С и -12 °С. Отсюда можно сделать вывод, что при сильных инверсионных ситуациях в приземном слое атмосферы маловероятно образование зоны с повышенным содержанием концентрации SO_2 . Зоны, где наблюдается превышения ПДК, ожидаются на уровне эффективной высоты источников.

Таким образом, разработанные математические модели и комплекс программ описывают реальные процессы, происходящие в реальной атмосфере, рассчитывают степень загрязнения атмосферного воздуха промышленного региона. Выявлены влияющие факторы на загрязнения воздуха, определены математические мо-

дели, методы, схемы вычислительных схем, видно, что математический аппарат, предлагаемый нами, позволяет разработать комплекс мероприятий по снижению уровня загрязнения окружающей среды. Разработанный программный комплекс позволит проводить мониторинг месторождений нефти и газа, управлять работой сети экологических систем металлургических и других промышленных предприятий, а также предотвращать экономический ущерб в ходе экологических загрязнении и их ликвидации.

Геоэкологические карты переноса вредных примесей в конвективных условиях. Распространению примесей типа SO_2 и NO_2 в конвективных атмосферных условиях посвящены рис. 3–4. На этих рисунках представлены изолинии концентрации SO_2 и NO_2 (в долях превышения ПДК) на трех уровнях по высоте для момента времени, соответствующего полному продуванию района месторождения. Это время примерно равно $40000/u_r$ с, где u_r – приземная скорость воздуха для данного варианта расчета. Оно обычно соответствует периоду времени, когда распространение примесей приобретает установившийся характер. В серии расчетов (рис. 5–6) скорость ветра увеличена вдвое по сравнению с вариантом расчета, представленным на рис. 3–4. Видно, что усиление скорости ветра способствует более интенсивному выносу примесей из района месторождения. Наиболее сильным источником загрязнения является агрегат УКСП-16. Кроме того, эти источники имеют и наибольшую эффективную высоту выбросов, в рассматриваемых условиях порядка 60 м. Поэтому, как показывают рис. 5 и 6, на этой высоте имеет место наибольшее превышение ПДК. Для NO_2 превышение ПДК наблюдается на всех высотах, в том числе и в призем-

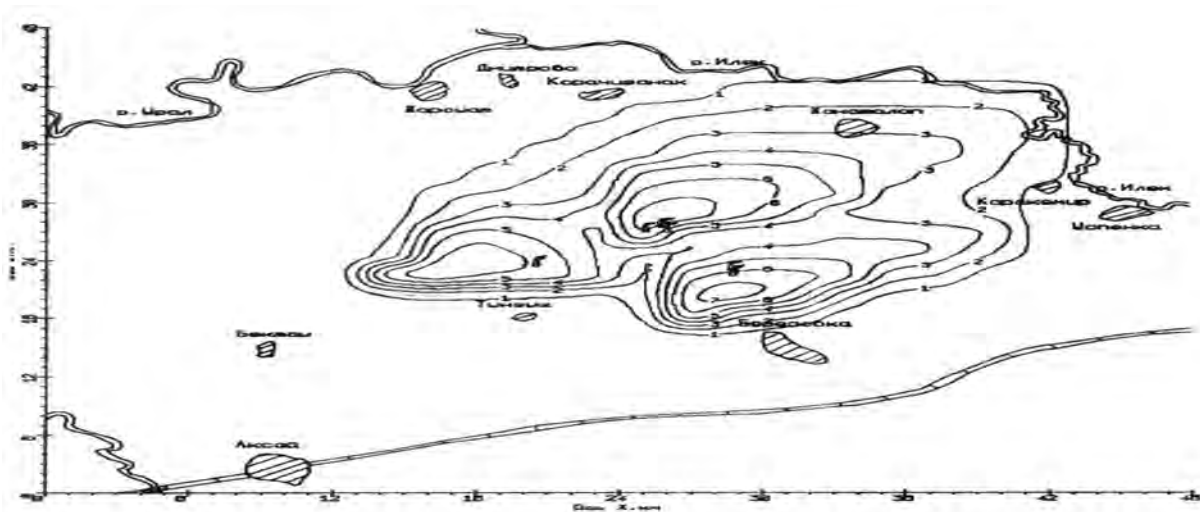


Рис. 2. Изолинии концентрации сернистого газа на уровне $Z = 2$ м в момент времени $t = 16$ ч 00 мин

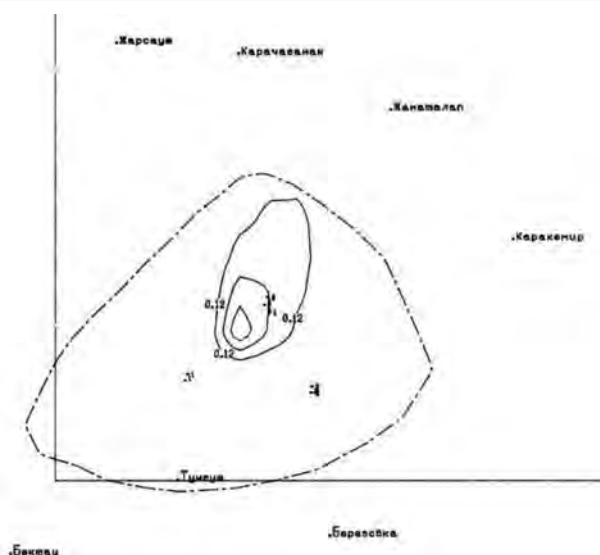


Рис. 3. Изолинии концентрации CO_2 в долях ПДК на высоте 250 м. $Max CO_2 - 0,47$

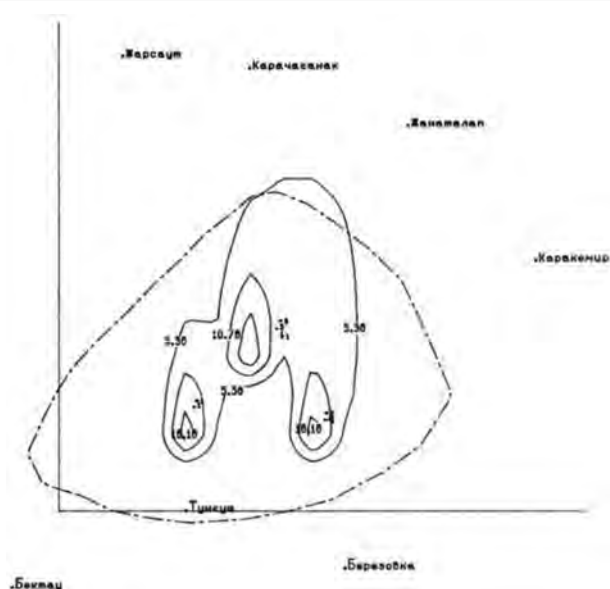


Рис. 4. Изолинии концентрации NO_2 в долях ПДК на высоте 650 м. $Max NO_2 - 21,56$

ном слое, в несколько раз. Это связано с большим объемом выброса этой примеси из агрегатов УКСП-16. Порядок превышения объема выброса NO_2 по сравнению с SO_2 составляет величину, близкую к 500. Вклад остальных источников загрязнения в суммарное загрязнение уже не столь значительный, и, кроме того, они имеют сравнительно небольшую эффективную высоту (в пределах 50-100 м). Наибольший интерес представляет распределение NO_2 на рис. 4.

Примесь распространяется в направлении движения воздушной массы, причем, поскольку имеет место поворот вектора скорости влево в пределах пограничного слоя атмосферы, то аналогичную ориентацию имеет форма рассеи-

вания на разных высотах. Это хорошо видно, например, из анализа рис. 4.

Геоэкологические карты переноса вредных примесей в инверсионных условиях. Распространение примесей в устойчивых атмосферных условиях, проводилось для двух вариантов: в первом случае скорость ветра в приземном слое выбрана равной 2 м/с (рис. 7), а во втором – 4 м/с (рис. 8). Время расчета соответствовало периоду полного продувания района месторождения, имеющего протяженность порядка 40 км. Увеличение скорости ветра приводит к стимулированию более интенсивного выноса загрязнений за пределы этого района. Эффективная высота выбросов максимальна для агре-

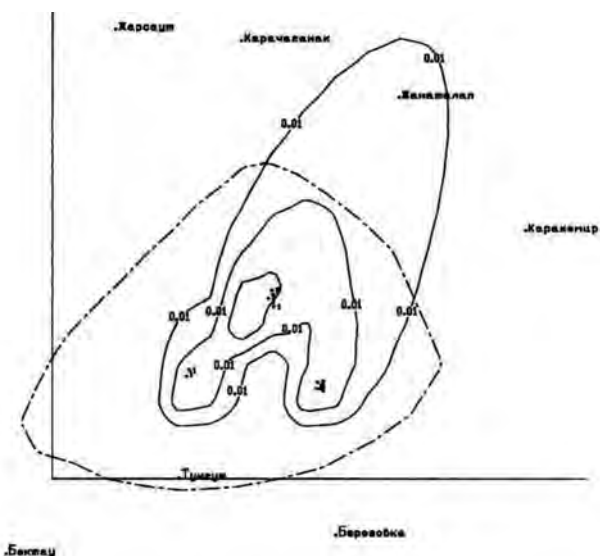


Рис. 5. Изолинии концентрации CO_2 в долях ПДК на высоте 50 м. $Max CO_2 - 0,03$

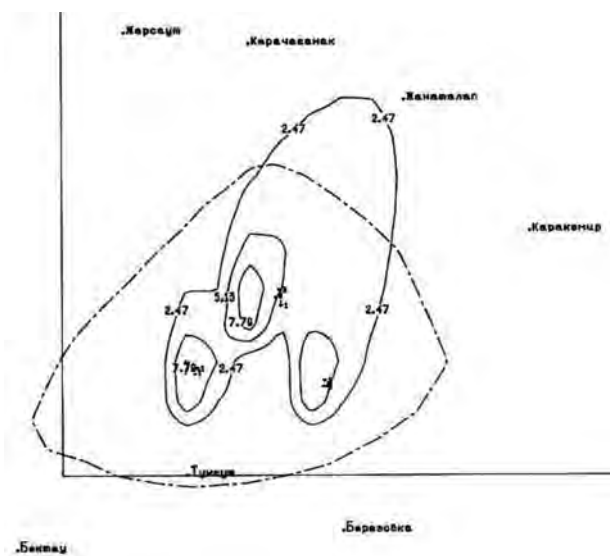


Рис. 6. Изолинии концентрации NO_2 в долях ПДК на высоте 650 м. $Max NO_2 - 10,44$

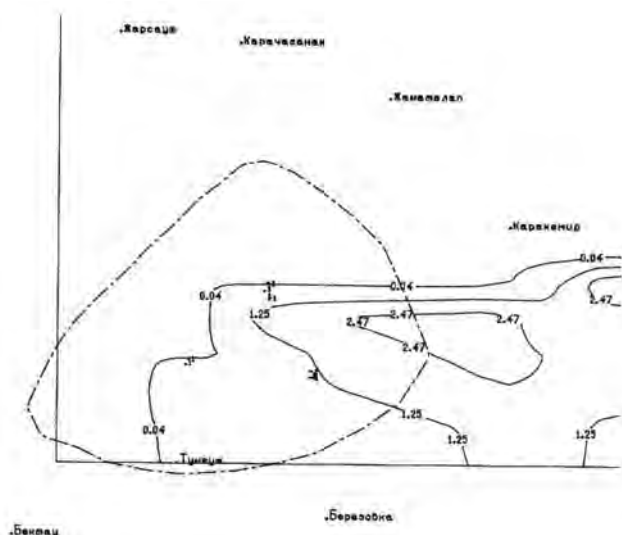


Рис. 7. Изолинии концентрации CO_2 в долях ПДК на высоте 10 м. $Max CO_2 - 3,69$

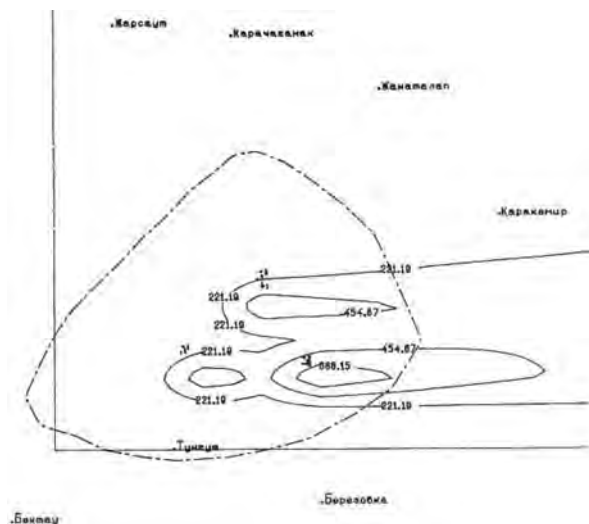


Рис. 8. Изолинии концентрации NO_2 в долях ПДК на высоте 70 м. $Max NO_2 - 921,63$

гатов УКСП-16 (70–100 м), а для других источников загрязнения находится вблизи верхней границы приземного слоя (10–20 м). Поскольку наиболее мощные источники имеют достаточно большую эффективную высоту, то из-за инверсионных условий максимальное выпадение примесей в приземном слое наблюдается на значительном удалении от источников (рис. 8).

Распространение примесей происходит по направлению ветра, причем так же, как и в конвективных условиях заметно изменение этого направления с высотой (поворот влево согласно модели Экмана). Отметим также более интенсивное загрязнение примесью NO_2 на высоте, близкой к эффективной высоте выбросов. Превышение ПДК, например на рис. 6, имеет порядок несколько сотен. Это объясняется тем, что в инверсионных условиях отсутствуют восходящие потоки воздуха и слабо выражена вертикальная турбулентность, это приводит к локализации выбросов вблизи источников загрязнения. Наблюдается также отмеченный при анализе расчетов по простейшей модели в устойчивых условиях и, на первый взгляд, странный эффект, когда усиление ветра приводит к более интенсивному загрязнению вблизи земли и на фиксированной высоте порядка 70 м. Это связано с аналогичным фактом – увеличение скорости ветра при неизменных метеопараметрах заметно уменьшает эффективную высоту выбросов. А это приводит, в свою очередь, к приближению высоты оси дымового факела к поверхности земли. Таким образом, можно сделать вывод, что наряду с известными опасными метеоситуациями, которые создаются при инверсиях и их сочетаниях со штилем, отмеченная метеоситуация также относится к числу наиболее опасных.

Заключение

Выполненные исследования по выявлению степени воздействия производственных процессов нефтегазовой и металлургической промышленности на окружающую среду Западного Казахстана позволит определить необходимые меры по ее защите. Разработан и предложен комплекс мероприятий по охране воздушной атмосферы, разработаны природоохранные мероприятия и подходы к обеспечению экологической безопасности – комплекс мероприятий по уменьшению выбросов в атмосферу, мероприятия по охране вод и почвенного покрова, выявлена экономическая эффективность от внедрения природоохранных мероприятий, проведен анализ мероприятий по снижению выбросов вредных веществ при транспортировке и хранении нефтепродуктов.

На основе предлагаемого комплекса моделей и программных продуктов можно решать следующие класс практических и исследовательских задач по изучению локальной циркуляции в ограниченной области:

- исследование влияния антропогенных изменений свойств (термических, динамических, влажности и др.) подстилающей поверхности на динамику пограничного слоя атмосферы;
- изучение закономерностей распространения загрязняющих примесей совместно с развитием гидротермодинамических процессов при различных погодных условиях (инверсии, штиле, внешнем потоке и др.) и с учетом изменений характеристик подстилающей поверхности региона;
- численное моделирование гидрометеорологического режима региона, оценка и контроль загрязнения атмосферы и промышленных регионов.

Модель локальных атмосферных процессов со свободной верхней границей была адаптирована для моделирования атмосферной циркуляции региона. По структуре – это комплекс математических моделей, привязка которых к условиям конкретного региона осуществляется на уровне входной информации.

Библиографический список

1. Айдосов А. А. Модели экологической обстановки окружающей среды при реальных атмосферных процессах / А. А. Айдосов, Г. А. Айдосова, Н. С. Заурбеков. – Алматы, 2010. – 368 с.
2. Айдосов А. А. Теоретические основы прогнозирования природных процессов и экологической обстановки окружающей среды / А. А. Айдосов, Н. С. Заурбеков // Теоретические основы прогнозирования атмосферных процессов, экологической обстановки окружающей среды и построение геоэкологической карты на примере КНГКМ. – А., 2000. – Кн. 3. – 220 с.
3. Заурбеков Н. С. Модели процессов приземного слоя атмосферы / Н. С. Заурбеков // Вестник Министерства образования и науки РК. – Алматы, 2000. – № 6. – С. 41–45.
4. Айдосов А. А. Концептуальные основы решения проблем экологии / А. А. Айдосов, Г. А. Айдосова, Н. С. Заурбеков // Известия Национальной Академии Наук Кыргызской Республики. – Бишкек: Илим, 2007/3. – С. 56–60.
5. Заурбеков Н. С. Численное моделирование вредных веществ в нижнем слое атмосферы / Н. С. Заурбеков. // Вестник Национальной инженерной академии Республики Казахстан. – Алматы, 2007. – № 1 (23). – С. 38–44.
6. Заурбеков Н. С. Численный анализ и прогноз аномалий атмосферных процессов с использованием сопряженных функции / Н. С. Заурбеков // Вестник КазНУ. Серия математика, механика, информатика. – А., 2011. – № 2 (69). – С. 97–101.
7. Заурбеков Н. С. Дискретизация системы уравнений динамики атмосферы и построение конечно-разностных аппроксимаций / Н. С. Заурбеков // Вестник Казахского национального технического университета имени К. И. Сатпаева. – Алматы, 2008. – № 1 (64). – С. 20–26.
8. Aidossov A. A. Mathematical modeling and numerical calculation by the method of large particles of the impact of active layer of soil to the contamination in the region taking into account processes in the lower atmosphere / A. A. Aidossov, G. A. Aidossov, N. S. Zaurbekov // Abstracts of the IV Congress of The Turkic World Mathematical Society, 1-3 juli 2011. – Baku, Azerbaijan, 2011. – С. 422.
9. Айдосов А. А. Математическая модель распространения монодисперсионной пассивной примеси в атмосфере / А. А. Айдосов, Н. Т. Данаев, Г. А. Айдосова, Н. С. Заурбеков // Вычислительные технологии (Новосибирск). Т. 13. Вестник КазНУ им. аль-Фараби. Серия «Математика, механика, информатика». № 3 (58) (совм. вып.). Ч. 1. – Алматы; Новосибирск, 2008. – С. 104–110.
10. Айдосов А. А. Математическое моделирование распространения промышленных выбросов в нижнем слое атмосферы / А. А. Айдосов, Н. Т. Данаев, Г. А. Айдосова, Н. С. Заурбеков // Вычислительные технологии (Новосибирск). Т. 13. Вестник КазНУ им. аль-Фараби. Серия «Математика, механика, информатика». № 3 (58) (совм. вып.). Ч. 1. – Алматы; Новосибирск, 2008. – С. 111–119.
11. Айдосов А. А. Вычислительный эксперимент реализации численных расчетных моделей переноса и диффузии примеси в пограничном слое атмосферы / А. А. Айдосов, Н. С. Заурбеков, Г. Н. Заурбекова // Вестник Алматинского технологического университета. – Алматы, 2012. – Вып. 5. – С. 88–95.
12. Айдосов А. А. Примеры численного расчета вертикальных движений вблизи облаков / А. А. Айдосов, Г. А. Айдосов, Г. Н. Заурбекова, Н. Д. Заурбекова // Труды Международной научно-практической конференции «Новости научного прогресса» (Болгария, 17–25 августа, 2011 г.). Т. 9. – София: БялГРАД-БГ ОГД, 2011. – С. 71–73.

Поступила 14.04.2016

Metallurgical and Mining
Industry

www.metaljournal.com.ua