

## ИССЛЕДОВАНИЕ УРОВНЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ПРИ ФУНКЦИОНИРОВАНИИ КРУПНЫХ ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

*Н.Н. Беляев, Днепрпетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Украина*

*Т.И. Русакова, Днепрпетровский национальный университет имени О. Гончара, Украина  
В.Е. Колесник, А.В. Павличенко, Национальный горный университет, Украина*

Разработана математическая модель и методика численного расчета уровня загрязнения атмосферного воздуха выбросами промышленных предприятий с учетом химической трансформации диоксида серы, на основе совместного решения уравнений переноса примеси для каждого вида загрязнителя, который поступает от источника загрязнения и который образуется в результате химических реакций в атмосфере.

Одной из базовых отраслей экономики Украины является металлургическая промышленность, которая объединяет предприятия и организации горно-металлургического комплекса. Металлургическая отрасль обеспечивает более 25% промышленного производства государства, около 40% валютных поступлений и более 10% поступлений в государственный бюджет Украины. В мировом производстве черной металлургии доля Украины, по данным Международного института чугуна и стали, составляла 7,4% в 2007 году. В 2013 году Украина занимала 10 место в мире по объему производства стали. В 2014 году производство стали по сравнению с 2013 годом сократилось на 17%. До июля 2015 года производство стали сократилось на 27,3%.

Предприятия металлургии и энергетики являются главными загрязнителями воздуха: ежегодно дают 32-35% загрязнений от всех стационарных источников. За последние годы в Украине в атмосферу выброшено более 100 млн. т вредных веществ. Предприятия металлургии и энергетики являются очагами загрязнения атмосферы крупных городов.

Так, современная теплоэлектростанция мощностью 2,4 млн. кВт расходует до 20 тыс. т угля в сутки и выбрасывает в атмосферу в сутки 680 т  $SO_2$  и  $SO_3$ , 120-140 т твердых частиц (зола, пыль, сажа), 200 т оксидов азота. При выплавке одной тонны стали в атмосферу выбрасывается 0,04 т твердых частиц, 0,03 т оксидов серы и до 0,05 т оксидов углерода, а также в небольших количествах марганец, свинец, фосфор, мышьяк, пары ртути и др.

Одним из основных загрязнителей окружающей среды при работе металлургических предприятий являются соединения серы. Их относят к одним из самых вредных газов из числа наиболее распространенных загрязнителей воздуха. Наиболее опасным для жизни и здоровья людей является диоксид серы  $SO_2$ , образующийся при сжигании органического топлива (угля, нефти), содержащего серу, а также при промышленной переработке серосодержащего сырья.

Вредное воздействие вызывается не только самим диоксидом серы, основной ущерб наносит триоксид серы  $SO_3$ , образующийся при окислении  $SO_2$ . Диоксид серы нелегко окисляется в чистом воздухе. Однако в присутствии пылеобразных частиц оксидов металлов под воздействием  $O_2$  диоксид серы очень быстро превращается в  $SO_3$ . Реакция протекает на поверхности частиц, которые играют роль гетерогенного катализатора. В выбрасываемых газах содержится значительное количество тонкоизмельченных твердых веществ – золы, находящейся во взвешенном состоянии в воздухе. Окислению  $SO_2$  также способствует наличие в воздухе капелек влаги, т. е. тумана или облаков, а растворенный в воде  $SO_2$  окисляется довольно быстро.

При эмиссии  $SO_2$  в атмосфере возможны следующие реакции:

- газофазное молекулярное окисление;
- газофазное окисление радикалами;
- окисление на поверхности твердых частиц;
- окисление жидко-капельных частиц.

Реакции первого типа идут медленно, константа реакции  $10^{-3} \text{ ч}^{-1}$ , что соответствует времени жизни  $\tau=1000$  ч. Реакции второго типа зависят от времени суток, сезона, широты местности

(радикалы образуются в результате фотохимических реакций), константа реакции  $0,015 \text{ ч}^{-1}$ , что соответствует времени жизни  $\tau \approx 70$  ч, днем летом. Газофазное окисление соединений серы ночью может поддерживаться лишь молекулярными реакциями, такое газофазное окисление идет значительно медленнее, чем окисление радикалами. Реакции третьего типа (гетерогенные реакции) зависят от количества частиц, их размера, физико-химических свойств поверхности. Для промышленного региона константа реакции  $0,003-0,01 \text{ ч}^{-1}$  и  $\tau \approx 100-300$  ч, реакция резко ускоряется в условиях повышенной влажности. Реакции четвертого типа зависят от вероятности попадания молекулы в жидко-капельную фазу (облаков и туманов), реакции могут носить каталитический характер, с учетом чередования сухих и дождливых или туманных периодов времени, константа реакции  $0,007 \text{ ч}^{-1}$  и  $\tau \approx 140$  ч. Все эти реакции приводят к образованию серной кислоты, т.к.  $SO_3$  практически мгновенно превращается в серную кислоту. Указанные значения констант непостоянны, они зависят от расстояния до источника выбросов, скорость окисления серы снижается при удалении от источника. Обобщенный коэффициент реакций и механизмов окисления, т.е. полная эффективная скорость химических превращений  $SO_2$  в атмосфере  $0,027 \text{ ч}^{-1}$  и  $\tau \approx 37$  ч.

Один из основных способов превращения  $SO_2$  в  $SO_3$  является фотохимическое окисление. Поглощение молекулой  $SO_2$  фотона с длиной волны более 300 нм может привести к переходу одного из ее электронов с одной орбитали на другую, более высокую. При этом молекула переходит в возбужденное состояние, повышается ее реакционная способность:

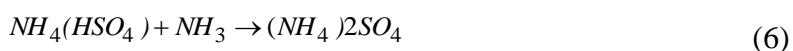


где  $SO_2^*$  – электронно-возбужденная молекула  $SO_2$ . Триоксид серы  $SO_3$ , образовавшийся тем или иным способом, в зависимости от конкретного состояния атмосферы, растворяется в капельках влаги с образованием серной кислоты:



В результате увеличения выбросов в атмосферу оксидов серы резко повысилось содержание серной кислоты в осадках. Мировые антропогенные выбросы диоксида серы превышают сегодня 150 млн. т в год.

В тех местностях, где в атмосфере содержится аммиак  $NH_3$ , может происходить кислотно-основное взаимодействие, приводящее к образованию гидросульфата аммония  $(NH_4)HSO_4$  или сульфата аммония  $(NH_4)_2SO_4$  при взаимодействии с концентрированным раствором аммиака:



Плотная дымка, окутывающая многие крупные промышленные районы, состоит главным образом из рассеянного в воздухе сульфата аммония, образующегося указанным путем. Дышать таким воздухом небезопасно. Результатом переполнения атмосферы сернистыми и азотными оксидами, образующими кислоты, становятся кислотные дожди, чей водный показатель (рН) ниже нормы, а попадая в водоем или почву, такие осадки влияют на изменение водно-щелочного баланса. Кислотные дожди влияют на поверхностные воды, почву наземные и водные экосистемы, на различные конструкции, здания.

В результате химических, фотохимических, физико-химических реакций между загрязняющими веществами и компонентами атмосферы, образуются другие вторичные загрязняющие вещества. Основным источником пирогенного загрязнения на планете являются тепловые электростанции, металлургические и химические предприятия, котельные установки, потребляющие более 70% ежегодно добываемого твердого и жидкого топлива.

Актуальной является задача по оценке загрязнения атмосферного воздуха выбросами промышленных предприятий и электростанций. Решение такого класса задач требует создания математических моделей для проведения оперативной оценки уровня загрязнения воздушной среды.

В настоящее время используются: эмпирические модели – нормативная методика ОНД 86; аналитическая модель Гаусса и ее разновидности, численные модели [1–5, 9, 10]. Эмпирические и аналитические модели позволяют рассчитывать поле концентрации загрязняющего вещества при стационарном точечном источнике загрязнения без больших затрат компьютерного времени. Использование численных моделей, основанных на решении уравнений Навье-Стокса с учетом различных моделей турбулентности для данного класса задач осуществляется как правило на дорогостоящих программных пакетах типа Ansys, требующих значительных затрат компьютерного времени даже при проведении одного вычислительного эксперимента. Также разработаны математические модели для решения задач по охране атмосферы, гидросферы и подстилающей поверхности на основе трехмерных нестационарных мезомасштабных процессов в атмосфере и стратифицированных водоемах [1]. Рассматриваются вопросы по снижению техногенного влияния на окружающую среду выбросов от металлургической промышленности [6].

Целью данной работы является создание программного обеспечения для оперативного проведения численного расчета по исследованию уровня загрязнения атмосферного воздуха в близлежащих районах, где расположены крупные промышленные предприятия с учетом метеорологических параметров окружающей среды. Оценка зон загрязнения и их влияния на близлежащие территории, примыкающие к исследуемым объектам.

Процесс рассеивания  $SO_2$  в атмосфере сопровождается рядом химических реакций [3]. Учесть все реакции при моделировании практически невозможно. Поэтому на практике ограничиваются учетом некоторых из них. При решении поставленной задачи будем учитывать процесс образования серной кислоты при взаимодействии  $SO_2$  с водяными парами. В этом случае моделирующими уравнениями являются [2, 5]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \text{div}(\mu \text{grad} C) + \sum_{i=1}^N Q_i(t) \delta(x-x_i) \delta(y-y_i), \quad (7)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\sigma \cdot C \cdot W, \quad (8)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial uW}{\partial x} + \frac{\partial vW}{\partial y} = \text{div}(\mu \text{grad} W), \quad (9)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial uA}{\partial x} + \frac{\partial vA}{\partial y} = \text{div}(\mu \text{grad} A) \quad (10)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \sigma \cdot C \cdot W \quad (11)$$

где  $C$  – концентрация  $SO_2$ ;  $W$  – концентрация водяных паров;  $A$  – концентрация серной кислоты  $H_2SO_4$ ;  $u, v$  – компоненты вектора скорости ветра, осредненные по высоте переноса [5];  $\mu = (\mu_x, \mu_y)$  – коэффициент турбулентной диффузии;  $Q$  – интенсивность выброса загрязнителя  $SO_2$ ;  $\delta(x-x_i)\delta(y-y_i)$  – дельта-функция Дирака;  $x_i, y_i$  – координаты источника выброса;  $\sigma$  – коэффициент, учитывающий химический распад  $SO_2$ ,  $\sigma=0,027 \text{ ч}^{-1}$  [1];  $t$  – время. Содержание водяных паров в атмосфере 60%.

Уравнения (7), (9), (10) описывают рассеивание выбросов  $SO_2$ , водяных паров и серной кислоты под действием ветра и атмосферной диффузии. Уравнения (8), (11) учитывают изменения концентрации  $SO_2$  за счет образования серной кислоты и изменения концентрации серной кислоты за счет химической трансформации  $SO_2$ . Дополнительно будем учитывать процесс взаимодействия  $SO_2$  с аммиаком, который содержится в атмосферном воздухе промышленных городов. Наличие аммиака в атмосферном воздухе населенных пунктов

можно принять на уровне среднесуточной предельно допустимой концентрации 0,04 мг/м<sup>3</sup>. Для учета взаимодействия SO<sub>2</sub> с аммиаком необходимо проинтегрировать, на каждом временном шаге, следующее уравнение:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\sigma_A \cdot N \cdot C, \quad (12)$$

где  $N$  – концентрация аммиака в атмосферном воздухе,  $\sigma_A = 0,003 \text{ ч}^{-1}$ .

Постановка краевых условий для данного уравнения рассмотрена в работах [2, 5, 7]. Численное интегрирование уравнений переноса примеси (7), (9), (10) проводится с помощью неявной разностной схемы расщепления [7]. Приведем описание для одного из уравнений переноса, например для уравнения (7). Аналогично выполняется интегрирование и для уравнений (9), (10).

Производная по времени аппроксимируется разделенной разностью «назад»:

$$\frac{\partial C}{\partial t} \approx \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t}.$$

В конвективных производных слагаемые однонаправленного переноса записываются в виде:

$$\frac{\partial u C}{\partial x} = \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x}; \quad \frac{\partial v C}{\partial y} = \frac{\partial v^+ C}{\partial y} + \frac{\partial v^- C}{\partial y}.$$

С учетом предыдущего выражения конвективные производные аппроксимируются разделенными разностями «против потока» на верхнем временном слое:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u^+ C}{\partial x} &\approx \frac{u_{i+1,j}^+ C_{i,j}^{n+1} - u_{i,j}^+ C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ C^{n+1}; & \frac{\partial u^- C}{\partial x} &\approx \frac{u_{i+1,j}^- C_{i+1,j}^{n+1} - u_{i,j}^- C_{i,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- C^{n+1}; \\ \frac{\partial v^+ C}{\partial y} &\approx \frac{v_{i,j+1}^+ C_{i,j}^{n+1} - v_{i,j}^+ C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+ C^{n+1}; & \frac{\partial v^- C}{\partial y} &\approx \frac{v_{i,j+1}^- C_{i,j+1}^{n+1} - v_{i,j}^- C_{i,j}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^- C^{n+1}. \end{aligned}$$

Компоненты скорости  $u$  определяются на вертикальных гранях разностных ячеек, а компоненты скорости  $v$  – на горизонтальных гранях. Индексы этих граней соответствуют индексам ячеек, расположенных правее или выше соответствующей грани.

Вторые производные аппроксимируются следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) &\approx \mu_x \frac{C_{i+1,j}^{n+1} - C_{i,j}^{n+1}}{\Delta} - \mu_x \frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i-1,j}^{n+1}}{x^2} = M_{xx}^- C^{n+1} + M_{xx}^+ C^{n+1}; \\ \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) &\approx \mu_y \frac{C_{i,j+1}^{n+1} - C_{i,j}^{n+1}}{\Delta} - \mu_y \frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j-1}^{n+1}}{x^2} = M_{yy}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1}, \end{aligned}$$

где  $L_x^+$ ,  $L_x^-$ ,  $L_y^+$ ,  $L_y^-$ ,  $M_{xx}^+$ ,  $M_{xx}^-$ ,  $M_{yy}^+$ ,  $M_{yy}^-$  – условные обозначения разностных операторов. С учетом приведенных выше обозначений разностный аналог уравнения переноса записывается как:

$$\frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j}^n}{\Delta t} + L_x^+ C^{n+1} + L_x^- C^{n+1} + L_y^+ C^{n+1} + L_y^- C^{n+1} + \sigma C_{ij}^{n+1} = (M_{xx}^+ C^{n+1} + L_{xx}^- C^{n+1} + L_{yy}^+ C^{n+1} + L_{yy}^- C^{n+1}) + q_{ij} \delta_{ij}.$$

Обозначаем  $\delta_{ij}$  – число «1» или «0», в зависимости от того, расположен или нет в разностной ячейке « $ij$ » источник загрязнения. Значение  $q_{ij}$  равно интенсивности  $q_k$  соответствующего  $k$ -го источника, размещенного в разностной ячейке « $ij$ », деленной на площадь этой ячейки:  $q_{ij} = q_k / (\Delta x \cdot \Delta y)$ .

Расщепляем разностное уравнение на четыре разностных уравнения так, чтобы на каждом

шаге учитывалось лишь одно направление переноса возмущений, определяемое знаком при конвективной производной. В этом случае разностные уравнения имеют вид:

- на первом шаге расщепления  $k = \frac{1}{4}$

$$\frac{C_{ij}^{n+k} - C_{ij}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^+ C^k + L_y^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \frac{1}{4}(M_{xx}^+ C^k + M_{xx}^- C^n + M_{yy}^+ C^k + M_{yy}^- C^n) + \sum_{l=1}^N \frac{\bar{q}_l}{4} \delta_l ;$$

- на втором шаге расщепления  $k = n + \frac{1}{2}$ ,  $c = n + \frac{1}{4}$

$$\frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^- C^k + L_y^- C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c) + \sum_{l=1}^N \frac{\bar{q}_l}{4} \delta_l ;$$

- на третьем шаге расщепления  $k = n + \frac{3}{4}$ ,  $c = n + \frac{1}{2}$

$$\frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^+ C^k + L_y^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^c + M_{xx}^+ C^k + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c) + \sum_{l=1}^N \frac{\bar{q}_l}{4} \delta_l ;$$

- на четвертом шаге расщепления  $k = n + 1$ ,  $c = n + \frac{3}{4}$

$$\frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^- C^k + L_y^- C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^c + M_{yy}^+ C^k) + \sum_{l=1}^N \frac{\bar{q}_l}{4} \delta_l .$$

В приведенных разностных уравнениях используется значение  $\bar{q}_l = \frac{q_l}{\Delta x \Delta y}$ . Значение функции  $\delta_l$

тождественно равно нулю во всех ячейках, кроме тех, где расположен источник выброса.

Поскольку на каждом шаге расщепления шаблон разностных уравнений имеет треугольную форму, то на верхнем временном слое неизвестное значение функции  $C$  находится по методу «бегущего счета».

На основе построенной численной модели разработан пакет программ на языке Фортран.

Аналогичным образом выполняется численное интегрирование уравнений (8), (10).

Разработанная численная модель была применена для изучения динамики загрязнения атмосферного воздуха при стационарных выбросах диоксида серы металлургическим заводом имени Петровского в городе Днепр.

Источник эмиссии является постоянно действующим. Согласно данным экологического паспорта Днепропетровска относительно выбросов в атмосферу крупных предприятий, интенсивность выброса диоксида серы составляет  $Q=17,4$  г/с. Расчет выполнялся при следующих параметрах: размеры расчетной области 18 на 8 км; коэффициент диффузии, согласно [6]  $\mu = (0,1 \div 1) \cdot U$ ; осреднение по высоте переноса 600 м. В первом варианте расчета скорость ветра составляла  $U=6$  м/с при направлении ветра с северо-запада  $\alpha=20^\circ$  (рис. 1),  $C_{\max}=0,3426$  мг/м<sup>3</sup>,  $t=52$  с; во втором варианте расчета скорость ветра –  $U=8$  м/с при направлении ветра с северо-запада  $\alpha=60^\circ$  (рис. 2),  $C_{\max}=0,3226$  мг/м<sup>3</sup>,  $t=52$  с.

На этих рисунках значение концентрации представлено в процентах от величины максимальной концентрации на данный момент времени.

Хорошо видно, как с течением времени формируется сложная зона загрязнения. Облако загрязнения очень быстро охватывает близлежащие районы, находящиеся по направлению ветра.

При рассмотрении первой метеорологической ситуации (рис. 1) в зону загрязнения попадают: пр. Свободы, пр. Петровского, пр. Metallургов, пр. Пушкина, пр. Александра Поля, пр. Гагарина. Концентрация диоксида серы меняется по такой зависимости: ул. Заводская – до 55%, Киевская – до 45%, ул. Орловская – до 32%, ул. Рабочая – до 20%, ул. Титова – до 10%, ул. Богдана-Хмельницкого, захватывая пр. Гагарина – менее 6%.



Рис. 1. Зона загрязнения диоксидом серы при направлении ветра с северо-запада  $\alpha=20^\circ$ , один источник загрязнения



Рис. 2. Зона загрязнения диоксидом серы при направлении ветра с северо-запада  $\alpha=60^\circ$ , один источник загрязнения

При рассмотрении второй метеорологической ситуации (рис. 2), согласно которой было изменено направление ветра  $\alpha=60^\circ$  и скорость ветра  $U=8$  м/с, в зону загрязнения попадают: пр. Свободы, пр. Петровского, пр. Metallургов, пр. Богдана Хмельницкого. Концентрация диоксида серы меняется по такой зависимости: ул. Заводская – до 45%; ул. Киевская – до 40%, ул. Орловская – до 30%, ул. Рабочая – до 15%, ул. Титова – до 7%, ул. Победы – менее 4%.

На рис. 3 представлена зона загрязнения диоксидом серы, которая формируется при действии двух источников: завода Петровского и коксохимического завода. Исходные данные, метеорологические параметры и размеры расчетной области принимались такими же, как при первом варианте расчета при наличии одного источника загрязнения. Облако загрязнения охватывает: пр. Свободы, пр. Петровского, пр. Metallургов, пр. Пушкина, пр. Александра Поля, пр. Богдана Хмельницкого, пр. Гагарина. Концентрация диоксида серы меняется по такой зависимости: ул. Заводская – до 75%, ул. Киевская – до 65%, ул. Орловская – до 40%, ул. Рабочая – до 30%, ул. Титова – до 25%, ул. Запорожское шоссе – до 20%, ул. Космическая – менее 12%.

Для оценки влияния выбросов второго предприятия на уровень загрязнения атмосферного воздуха была выбрана расчетная точка на расстоянии 5 км (по оси  $x$ ) и 2,5 км (по оси  $y$ ) от источника выброса. При выбросе только от завода Петровского (рис. 2) концентрация загрязнения в реперной точке составляет порядка 12% от концентрации на выходе из промышленных труб (от  $C_{\max}=0,3226$  мг/м<sup>3</sup>), а при наличии второго источника загрязнения –

Коксохимического завода, концентрация в данной точке увеличивается и составляет порядка 30%, т.е. уровень загрязнения увеличивается в 2,2 раза. Таким образом, с помощью разработанной численной модели можно прогнозировать влияние выбросов на формирование зон загрязнения атмосферного воздуха в городе при строительстве новых предприятий или при реконструкции уже существующих.

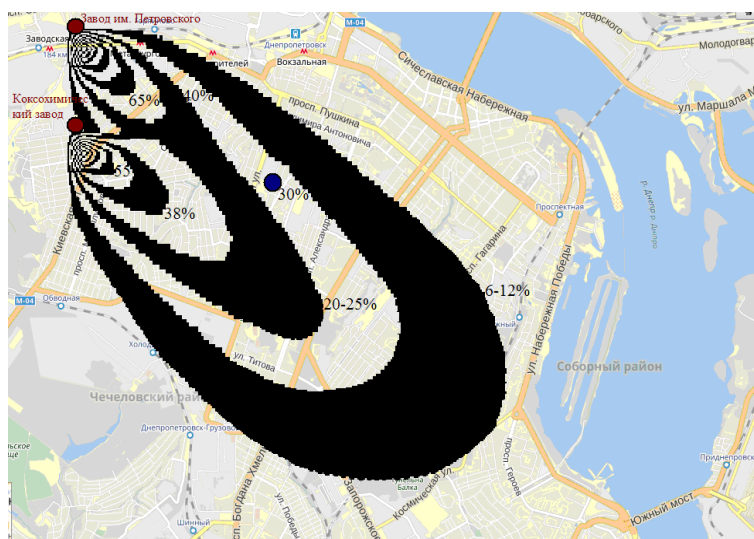


Рис. 3. Зона загрязнения диоксидом серы при направлении ветра с северо-запада  $\alpha=20^\circ$ , два источника загрязнения

При работе тепловых электростанций, которые используют органическое топливо, в атмосферу поступают загрязняющие вещества: оксиды серы, оксиды азота, углекислый газ, твердые частицы, гидрокарбонат и другие вещества. Выбросы ТЭС составляют 40% от суммарного выброса неподвижных источников загрязнения. ТЭС мощностью 1 ГВт при потреблении 3 млн. т. угля выбрасывает в окружающую среду: 7 млн. т.  $CO_2$ , 120 тыс. т.  $SO_x$ , 20 тыс. т.  $NO_x$ , 750 тыс. т. золы.

Анализ данных по выбросам в атмосферу крупных предприятий города Днепропетровска показал, что наибольшее количество  $SO_2$  поступает при работе Приднепровской ТЭС – 55434 т/год.

Разработанная численная модель была применена для оценки зоны загрязнения диоксидом серы при работе Приднепровской ТЭС.

Интенсивность выброса диоксида серы  $Q=1,78$  кг/с. Размеры расчетной области 15 км на 7,2 км; коэффициент диффузии, согласно [6]  $\mu=(0,1 \div 1) \cdot U$ ; осреднение по высоте переноса 600 м, скорость ветра с юго-востока составляла  $U=6$  м/с,  $C_{\max}=0,582$  мг/м<sup>3</sup>,  $t=52$  с.

Предельно допустимая концентрация  $SO_2$  (м.р. – 0,5 мг/м<sup>3</sup>, с.с. – 0,05 мг/м<sup>3</sup>).

При рассмотрении данной метеорологической ситуации (рис. 4) в зону загрязнения попадают: Соборный район, пр. Героев, пр. Гагарина, пр. Александра Поля, пр. Пушкина. Концентрация диоксида серы меняется по такой зависимости: южный мост – до 54%, ул. Набережная победы – до 30%, улицы пр. Гагарина – до 15%, улицы пр. Александра Поля – до 10%, ул. Владимира Антоновича менее 6%. В реперной точке (пр. Героев, рис. 4) концентрация  $SO_2$  составляет 22%, а именно  $C=0,1281$  мг/м<sup>3</sup>, что меньше максимально розовой концентрации, но больше среднесуточной в 2 раза.

В результате выполнения исследований получены следующие результаты:

- разработана численная модель расчета рассеивания выбросов в атмосфере с учетом изменения величины и направления скорости ветра, вертикального коэффициента диффузии с высотой;

- разработан программный пакет, позволяющий проводить вычислительные эксперименты по оценке уровня загрязнения атмосферного воздуха выбросами крупных промышленных предприятий с учетом химических реакций загрязнителей в атмосфере;



Рис. 4. Зона загрязнения диоксидом серы при направлении ветра с юго-востока  $\alpha=30^\circ$ , источник загрязнения – Приднепровская ТЭС

- проведено исследование уровня загрязнения атмосферного воздуха диоксидом серы в зоне влияния отдельно действующего завода Петровского и совместного действия завода Петровского и коксохимического завода;

- проведено исследование уровня загрязнения атмосферного воздуха диоксидом серы в зоне влияния Приднепровской ТЭС.

Проведение данного класса расчетов является необходимым инструментом для практической оценки экологической ситуации при работе больших промышленных предприятий, деятельность которых связана с поступлением в атмосферу загрязняющих веществ. Исследование уровня загрязнения атмосферного воздуха выбросами промышленных предприятий необходимо для экологически безопасного функционирования данных объектов. Перспективой развития данного направления является создание трехмерной модели, позволяющей учитывать рельеф и застройку местности.

#### Список литературы

1. Аргучинцев, В.К. Моделирование мезомасштабных гидротермодинамических процессов и переноса антропогенных примесей в атмосфере и гидросфере региона оз. Байкал / В. К. Аргучинцев, А. В. Аргучинцева. – Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2007. – 255 с.
2. Беляев, Н. Н. Моделирование нестационарных процессов аварийного загрязнения атмосферы [Текст] / Н. Н. Беляев, А. В. Берлов, П. Б. Машихина. – Днепропетровськ : Акцент ПП, 2014. – 127 с.
3. Израэль, Ю. А. Экология и контроль состояния природной среды [Текст] / Ю. А. Израэль. – М. : Гидрометеиздат, 1984. – 560 с.
4. Клименко, Л. П. Моделювання забруднення території шкідливими викидами в атмосферу відходів промислових підприємств [Текст] / Л. П. Клименко, Н. О. Воскобойнікова, О. О. Новосадовський // Наукові праці. – 2010. – т. 132. – в. 119. – С. 93–98.
5. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды [Текст] / Г. И. Марчук – Москва : Наука, 1982. – 320 с.
6. Проскуріна І.В. Зниження техногенного навантаження на навколишнє середовище від пилових викидів металургійної промисловості / І. В. Проскуріна // Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня к.т.н. – Суми, 2011. – 20 с.
7. Самарский, А. А. Теория разностных схем [Текст] / А. А. Самарский. – Москва : Наука, 1983. – 616 с.
8. Berkowicz R. A. Simple Model for Urban Background Pollution / R. A. Berkowicz // Environmental Monitoring and Assessment. – 2000. – Vol. 65. – P. 259-267.
9. Hanna S. Air Quality Modelling over Short Distances / S. Hanna // College on Atmospheric Boundary Layer and Air Pollution Modelling: 16 May-3 June. – 1994. – № SMR/760-2. – P. 712-743.
10. Ranzani da Costa, A. Modelling a new, low CO2 emissions, hydrogen steelmaking process / A. Ranzani da Costa, D. Wagner and F. Patisson // Published in Journal of Cleaner Production. – 2013– v. 46. – P. 27-32.