Бібліографічні посилання

1. **Белов, С.В.** Пористые металлы в машиностроении [Текст] / С.В. Белов. – М.:Машиностроение, 1981. – 247 с.

2. **Калиткин, Н.Н.** Численные методы [Текст]/ Н.Н.Калиткин. – М.: Наука, 1978. – 512 с.

3. **Лыков, А.В.** Явления переноса в капиллярно-пористых телах [Текст] / А.В.Лыков. – М.: Стройиздат, 1954. – 298 с.

4. **Сясев, В.А.** Проникновения газа через пористую стенку в зависимости от физических свойств газа [Текст] / В.А. Сясев, И.В. Селезнёва // Зб. тез V Міжнарод.наук. конф. Приклад. пробл. аерогідромеханіки та тепломасопереносу.– Д., 2014. –С. 128 – 130.

Надійшла до редколегії 12.06.2016

УДК 622.457:519.6

Н. Н. Беляев[1], Т. И. Русакова[2]

[1]Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна

[2]Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОГЕННОГО ВЛИЯНИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ ПРИДНЕПРОВСКОЙ ТЭС

Разработаны методика и программное обеспечение для проведения численного расчета при исследовании уровня загрязнения атмосферного воздуха в зоне влияния теплоэлектростанции, в результате деятельности которой в атмосферу поступают газоообразные загрязняющие вещества. Показано, что методика исследования уровня загрязнения атмосферного воздуха при функционировании ТЭС основана на математической модели для расчета концентрации загрязнителя (диоксида азота), которая учитывает процессы химической трансформации диоксида азота в атмосфере. Продемонстрировано, что численная методика базируется на совместном решении уравнений конвективно-диффузионного переноса примеси для каждого загрязнителя, который непосредственно выбрасывается предприятием и образуется дополнительно за счет химических реакций в атмосфере. Методика реализована с применением неявных разностных схем. На основе разработанной математической модели создано программное обеспечение, позволяющее проводить ряд численных экспериментов по исследованию уровня загрязнения атмосферного воздуха выбросами теплоэлектростанции. В результате выполненных расчетов были выделены зоны загрязнения Приднепровской ТЭС атмосферного воздуха диоксидом азота. Определены районы, которые наиболее подвержены загрязнению с учетом влияния метеорологических условий. Доказано, что созданное программное обеспечение необходимо для получения количественных результатов по оценке уровня концентрации загрязнителей в атмосфере с целью экологически безопасного функционирования крупных промышленных объектов, которые оказывают техногенное влияние на окружающую среду.

Ключевые слова: теплоэлектростанция, интенсивность выброса загрязнителя, концентрация загрязняющего вещества, химическая трансформация, уравнение переноса примеси, численная модель.

Розроблено методику та програмне забезпечення для проведення числового розрахунку під час дослідження рівня забруднення атмосферного повітря в зоні впливу теплоелектростанції, у результаті діяльності якої в атмосферу потрапляють газоподібні забруднюючі речовини. Показано, що методика дослідження рівня забруднення атмосферного повітря під час

© Беляев Н. Н., Русакова Т. И., 2016

функціонування ТЕС заснована на математичній моделі для обчислення концентрації забруднювача (діоксиду азоту), яка враховує процеси хімічної трансформації діоксиду азоту в атмосфері. Продемонстровано, що числова методика ґрунтується на спільному розв'язанні рівнянь конвективно-дифузійного перенесення домішки для кожного забруднювача, який безпосередньо викидає підприємство та який утворюється за рахунок хімічних реакцій у атмосфері. Методику реалізовано із застосуванням неявних різницевих схем. На основі розробленої математичної моделі створено програмне забезпечення, що дозволяє проводити деякі числові експерименти із дослідження рівня забруднення атмосферного повітря викидами теплоелектростанцій. У результаті виконання розрахунків було виділено зони забруднення Придніпровською ТЕС атмосферного повітря діоксидом азоту. Також визначено райони, які зазнають найбільшого забруднення з урахуванням впливу метеорологічних умов. Доведено, що створене програмне забезпечення необхідне для одержання кількісних результатів щодо оцінки рівня концентрації забруднювача в атмосфері для екологічно безпечного функціонування великих промислових об'єктів.

Ключові слова: теплоелектростанція, інтенсивність викиду забруднювача, концентрація забруднюючої речовини, хімічна трансформація, рівняння перенесення домішки, числова модель.

The development of methodology and software for holding a numericl calculation to research the level of atmospheric air pollution in the area of thermoelectric plant influation, as a result of its work there are gas pollutions that act into the atmosphere. The methodology for atmospheric air pollution level research (when thermoelectric plant functions) is based on math model for calculation the pollution consentration (nitrogen dioxide) that takes into account processes of nitrogen dioxide chemical transformation in atmosphere. Numerical methodology is based on the combined solutions to the convex and diffuse admixture transfer equations for every pollutant that comes from the plants and forms in chemical reactions in atmosphere. Implicit difference schemes are used in this methodology. Based on this math model, the software is worked out for carrying out some experments to research the level of atmospheric air pollution caused by thermoelectric plant emissions. As a result of these calculations, there are detected some atmospheric air zones that are polluted by nitrogen dioxide worked out by Pridniprovskiy thermoelectric plant. Several areas, which are subjected to contamination, are also detected. This study takes into account weather conditions. The software is necessary for obtaining some quantitative results to estimate the level of pollution consentration in atmosphere. The whole research can provide ecological security in large objects functioning that impact on the environment.

Key words: thermoelectric plant, intensity of pollution emissions, pollution consentration, chemical transformation, admixture transfer equation, numerical model.

Постановка проблемы и анализ публикаций. Окружающая среда является основой жизни человека, а ископаемые ресурсы и вырабатываемая из них энергия – основа современной цивилизации. Очевидно, что без энергетики у человечества нет будущего. Однако современная энергетика наносит ощутимый вред окружающей среде, ухудшая условия жизни людей. Главными составляющими современной энергетики являются различные типы электростанций. Электрическая энергия – важнейший, универсальный, самый эффективный технически и экономически вид энергии. Еще одно его преимущество – экологическая безопасность использования и передачи электроэнергии по линиям электропередач по сравнению с перевозкой топлива, его перекачкой по системам трубопроводов. Электричество способствует развитию природосберегающих технологий во всех отраслях производства. Однако выработка электроэнергии на многочисленных ТЭС, ГЭС, АЭС сопряжена со значительными отрицательными воздействиями на окружающую среду. Энергетические объекты вообще по степени влияния принадлежат к числу промышленных объектов, наиболее интенсивно воздействующих на биосферу.

На современном этапе проблема взаимодействия энергетики и окружающей среды приобрела новые черты, распространяя влияние на огромные территории, большинство рек и озёр, громадные объёмы атмосферы и гидросферы Земли. Ещё более значительные масштабы энергопотребления в обозримом будущем

предопределяют дальнейшее интенсивное увеличение разнообразных воздействий на все компоненты окружающей среды в глобальных масштабах. С ростом единичных мощностей блоков, электрических станций и энергетических систем, удельных и суммарных уровней энергопотребления возникает задача ограничения поступления загрязняющих выбросов в воздушный и водный бассейны, а также более полного использования их естественной рассеивающей способности.

Ранее при выборе способов получения электрической и тепловой энергии, путей комплексного решения проблем энергетики, водного хозяйства, транспорта, при назначении основных параметров объектов (тип и мощность станции, объем водохранилища и др.) руководствовались в первую очередь минимизацией экономических затрат. В настоящее же время на первый план все более выдвигаются вопросы оценки возможных последствий возведения и эксплуатации объектов энергетики.

Большинство электроэнергии (63,2 %) в мире вырабатывается на ТЭС. Поэтому вредные выбросы этого типа электростанций в атмосферу «обеспечивают» наибольшее количество антропогенных загрязнений в ней. Так, на их долю приходится примерно 40 % всех вредных выбросов, поступающих в атмосферу от промышленных предприятий [4].

В результате сжигания органического топлива выбросы ТЭС содержат пылевые частицы различного состава, оксиды серы, азота, фтористые соединения, оксиды металлов, газообразные продукты неполного сгорания топлива. Их поступление в воздушную среду наносит большой ущерб как всем основным компонентам биосферы, так и предприятиям, объектам городского хозяйства, транспорту и населению городов. Рассмотрим распределение годовых выбросов ТЭС мощностью 1000 МВт (табл. 1).

Таблица 1

Годовые выбросы ТЭС на органическом топливе мощностью 1000 МВт

Загрязняющее вещество, тыс. т	Газ	Мазут	Уголь
SO_x	0,012	52,66	139
NO_x	12,08	21,70	20,88
CO	Незначительно	0,08	0,21
Твердые частицы	0,46	0,73	4,49
Гидрокарбонаты	Незначительно	0,67	0,52

При работе ТЭС с наличием парового котла производительностью 170 т/ч выбрасывается 2,2 т/сут оксидов азота, а с производительностью 950 т/ч – 57 т/сут окислов азота. В процессе горения азот образует с кислородом ряд соединений [1]: N_2O, NO, N_2O_3, NO_2, N_2O_4 и N_2O_5, свойства которых существенно различаются. Как доказано Я.Б. Зельдовичем, реакция образования оксидов азота имеет термическую природу:

$$O_2+N_2=NO_2+N, \quad (1)$$

$$N+O_2=NO+O, \quad (2)$$

$$N_2+O_2=2NO. \quad (3)$$

В присутствии воздуха NO окисляется до NO_2. Диоксид азота NO_2 состоит из молекул двух видов – NO_2 и N_2O_4:

$$2NO_2 = N_2O_4. \quad (4)$$

В присутствии влаги NO_2 легко вступает в реакцию, образуя азотную кислоту:

$$3NO_2 + H_2O = 2HNO_3 + NO. \quad (5)$$

Азотистый ангидрид N_2O_3 разлагается при атмосферном давлении

$$N_2O_3 = NO + NO_2 \quad (6)$$

и образуется в присутствии кислорода

$$4NO + O_2 = 2N_2O_3. \quad (7)$$

Азотный ангидрид N_2O_3 – сильный окислитель. Взаимодействуя с водой, образует серную кислоту. Ввиду скоротечности реакций образования оксидов азота и их взаимодействий друг с другом и компонентами атмосферы, а также из-за излучения учесть точное количество каждого из оксидов невозможно. Поэтому суммарное количество NO_x приводят к NO_2. Но для оценок токсического воздействия необходимо учитывать, что соединения азота, выбрасываемые в атмосферу, имеют различную активность и продолжительность существования: NO_2 – около 100 ч, N_2O – 4,5 г. Аэрозоли подразделяются на первичные – непосредственно выбрасываемые и вторичные – образующиеся при превращениях в атмосфере. Время существования аэрозолей в атмосфере колеблется в широких пределах – от минут до месяцев, в зависимости от многих факторов. Крупные аэрозоли в атмосфере на высоте до 1 км существуют 2–3 сут, в тропосфере – 5–10 сут, в стратосфере – до нескольких месяцев. Подобно аэрозолям ведут себя и канцерогенные вещества, выбрасываемые или образующиеся в атмосфере. Однако точных данных о поведении этих веществ в воздухе практически нет.

Анализ последних исследований. Сделав оценку зарубежных работ по исследованию распространения выбросов в атмосфере от ТЭС, можно сделать вывод, что для расчетов в основном применяют аналитические модели [6–11]: модифицированную модель Гаусса [8; 11] с учетом коллокационного исследования сходимости [6], модели атмосферной дисперсии CALPUFF [7; 9], Safe-AIR II на основе лагранжевой модели, модифицированную модель Гаусса [10] ADMS-5. Они позволяют рассчитывать поле концентрации загрязняющего вещества при стационарном точечном источнике загрязнения без больших затрат компьютерного времени. Численное моделирование осуществляется как за рубежом, так и в Украине на основе дорогостоящих программных пакетов. В связи с этим остается актуальной задача численного моделирования рассеивания выбросов в атмосфере для проведения оперативных расчетов по управлению экологически безопасным функционированием ТЭС.

Формулировка цели написания статьи. Целью написания данной статьи является разработка численной модели и на ее основе создание программного обеспечения для оперативного проведения вычислительного эксперимента по исследованию техногенного влияния на окружающую среду газовых выбросов ТЭС, а также оценка зон загрязнения и их влияния на близлежащие территории, примыкающие к исследуемому объекту.

Изложение основного материала. Основные характеристики Приднепровской ТЭС: электрическая мощность – 1765 МВт; тепловая мощность – 845 Гкал/ч; основное топливо – уголь марки «АШ», газ, мазут; котельные агрегаты – 4×ТП-90,

2×ТПП-110, 2×ТПП-210; количество энергоблоков – 7 (4×150 МВт, 3×285 МВт, 1×310 МВт); количество и марка турбин – 4×К-150-130, 3×К-300-240, К-310-235.

Выбросы ТЭС претерпевают трансформацию в атмосфере. Этот процесс достаточно сложный. В настоящее время наиболее полно изучены следующие виды трансформаций:

$$NO_2 + h_\nu \xrightarrow{J} NO + O, \tag{8}$$

$$O + O_2 \rightarrow O_3, \tag{9}$$

$$NO + O_3 \xrightarrow{k_1} NO_2 + O_2. \tag{10}$$

Таким образом, для более качественного моделирования процесса загрязнения атмосферного воздуха нужно учитывать химическую трансформацию NO и NO_2. Для этого необходимо рассмотреть решение уравнений (11) – (12), которые описывают процесс рассеивания NO и NO_2 в атмосфере при эмиссии из труб ТЭС:

$$\frac{\partial[NO]}{\partial t} + \frac{\partial u[NO]}{\partial x} + \frac{\partial v[NO]}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}(\mu_x \frac{\partial[NO]}{\partial x}) + \\ + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_y \frac{\partial[NO]}{\partial y}) + Q_{NO}\delta(x - x_i)\delta(y - y_i), \tag{11}$$

$$\frac{\partial[O_3]}{\partial t} + \frac{\partial u[O_3]}{\partial x} + \frac{\partial v[O_3]}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}(\mu_x \frac{\partial[O_3]}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_y \frac{\partial[O_3]}{\partial y}), \tag{12}$$

$$\frac{\partial[NO_2]}{\partial t} + \frac{\partial u[NO_2]}{\partial x} + \frac{\partial v[NO_2]}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}(\mu_x \frac{\partial[NO_2]}{\partial x}) + \\ + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_y \frac{\partial[NO_2]}{\partial y}) + Q_{NO_2}\delta(x - x_i)\delta(y - y_i), \tag{13}$$

где Q_{NO} – интенсивность выброса NO ТЭС; Q_{NO_2} – интенсивность выброса NO_2; u, v – компоненты вектора скорости ветра; $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – коэффициент турбулентной диффузии; x_i, y_i – координаты источника выброса загрязняющего вещества; $\delta(x - x_i)$, $\delta(y - y_i)$ – дельта-функция Дирака, с помощью которой моделируется выброс ТЭС, значение функции δ тождественно равно нулю во всех ячейках, кроме тех, где расположен источник выброса.

Постановка краевых условий для данного уравнения рассмотрена в работах [2; 3]. Численное интегрирование уравнений переноса примеси (11) – (13) проводится с помощью неявной разностной схемы расщепления [3]. 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 следующем этапе рассматривается решение уравнений (14) – (16), которые описывают процесс химической трансформации загрязнителей:

$$\frac{d[NO]}{dt} = -k_1[NO][O_3] + J[NO_2], \tag{14}$$

$$\frac{d[NO_2]}{dt} = k_1[NO][O_3] - J[NO_2], \tag{15}$$

$$\frac{d[O_3]}{dt} = -k_1[NO][O_3] + J[NO_2]. \tag{16}$$

Эмпирические параметры k_1 и J определяются экспериментально и могут в оценочных расчетах принимать значения: $J = 0{,}0045$ s^{-1}, $k_1 = 0{,}00039$ ppb^{-1}s^{-1} [5]. Поскольку значение коэффициента k_1 приведено не в системных единицах концентрации, то в разработанной подпрограмме расчета химической трансформации осуществляется переход от значений концентрации в [мг/м^3] к значению в [ppb^{-1}s^{-1}] и обратно. Решение уравнений (14) – (16) осуществляется с помощью метода Эйлера.

Анализ данных по выбросам в атмосферу крупных предприятий Днепропетровска (экологический паспорт 2014 г) показал, что наибольшее количество NO_x поступает при работе Приднепровской ТЭС – 15399,971 т/г и Криворожской ТЭС – 15817,393 т/г (табл. 2).

Таблица 2

Годовые выбросы оксида азота крупных промышленных объектов Днепропетровска

Название объекта	Всего выбросов NO_x, т/г	Название объекта	Всего выбросов NO_x, т/г
Криворожская ТЭС	15817,393	Горно-обогатительный комплекс «Арселор Металл Кривой Рог»	2207,709
Приднепровская ТЭС	15399,971	Евраз–Днепропетровский металлургический завод им. Петровского	1066,608
Южный горно-обогатительный комбинат	7785,873	Коксохимическое производство «Арселор Металл Кривой Рог»	758,314
Металлургическое производство «Арселор Металл Кривой Рог»	5888,662	ИНТЕРПАЙП Нижнеднепровский трубопрокатный завод	437,807
Днепропетровский меткомбинат им. Дзержинского	4003,362	Никопольский завод ферросплавов	434,305

Разработанная численная модель была применена для оценки зоны загрязнения атмосферного воздуха диоксидом азота при работе Приднепровской ТЭС (рис.1).

Рис. 1. Приднепровская ТЭС

Интенсивность выброса оксидов азота – Q=0,4883 кг/с. Размеры расчетной области – $15\ \text{км} \times 7{,}2\ \text{км}$, коэффициент диффузии согласно [6] – $\mu = (0{,}1 \div 1) \cdot U$, осреднение по высоте переноса – 600 м, скорость ветра с северо-востока составляла

U =5 м/с, направление ветра с северо-востока – $\alpha = 20^\circ$, $C_{мах}$=0,3424 мг/м^3, t =52 с (рис. 2); во втором варианте расчета скорость ветра – U =8 м/с, при направлении ветра с северо-востока $\alpha = 20^\circ$ (рис. 3), $C_{мах}$ =0,3026 мг/м^3, t =52 с. Предельно допустимая концентрация NO_2 (м.р. – 0,085 мг/м^3, с.с. – 0,04 мг/м^3).

Рис. 2. Зона загрязнения диоксидом азота, U =5 м/с

Рис. 3. Зона загрязнения диоксидом азота, U =8 м/с

Согласно архиву погоды в г. Днепропетровске, по оценке розы ветров, северо-восточное направление ветра преобладает 13,2 % в году. В результате проведенных вычислительных экспериментов (рис. 2–3) в зону загрязнения попадает Лоц-Каменский район. Приведены значения концентрации, которые представлены в процентах от величины максимальной концентрации на данный момент времени (рис. 2–3). При увеличении скорости ветра процентное содержание NO_2

в атмосфере понижается, зона с пониженной концентрацией менее 10 % увеличивается по направлению ветра. В реперной точке значение концентрации NO_2 составляет в первом случае 31 % (рис. 2), а именно C=0,10614 мг/м^3, что больше максимальной разовой концентрации; во втором случае – 26 % (рис. 3), а именно C=0,0787 мг/м^3, что уже меньше максимальной разовой концентрации.

Выводы. В результате выполнения численных исследований были получены следующие результаты:

– разработана численная модель расчета рассеивания диоксида азота в атмосфере с учетом химической трансформации оксидов азота в атмосфере;

– создан комплекс программ и проведены вычислительные эксперименты по оценке уровня загрязнения атмосферного воздуха выбросами диоксида азота Приднепровской ТЭС;

– проведено исследование уровня загрязнения атмосферного воздуха диоксидом азота в зоне влияния Приднепровской ТЭС;

– оперативность в проведении данного класса расчетов (менее 1 мин) является необходимым практическим инструментом для экологически безопасного функционирования ТЭС, деятельность которых связана с поступлением в атмосферу вредных загрязняющих веществ.

Библиографические ссылки

1. **Израэль, Ю.А.** Экология и контроль состояния природной среды [Текст] / Ю.А. Израэль. – М.: Гидрометеоиздат, 1984. – 560 с.

2. **Марчук, Г.И.** Математическое моделирование в проблеме окружающей среды [Текст] / Г.И. Марчук. – М.: Наука, 1982. – 320 с.

3. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде [Текст] / М.З. Згуровский, В.В. Скопецкий, В.К. Хрущ, Н.Н. Беляев. – К.: Наук. думка, 1997. – 368 с.

4. **Уорк, К.** Загрязнение воздуха. Источники и контроль [Текст] / К. Уорк, С. Уорнер. – М. Мир, 1980. – 539 с.

5. **Berkowicz, R.A.** Simple Model for Urban Background Pollutio [Text] / R. A. Berkowicz, H. Overman // Environmental Monitoring and Assessment. – 2000. – Vol. 65. – P. 259–267.

6. **Gorle, J.M.R.** Dispersion modeling of thermal power plant emissions on stochastic space [Text] / J.M.R. Gorle, N.R. Sambana // Theoretical and Applied Climatology. – 2016 May. – Vol. 124, is. 3. – P. 1119–1131.

7. **Levy, JI** Modeling the benefits of power plant emission controls in Massachusetts [Text] / JI Levy, JD Spengler // J. Air Waste Manag Assoc. – 2002 Jan. – 52(1). – P. 5–18.

8. **Khandakar Md Habib Al Razi** Modeling of atmospheric dispersion of mercury from coal - fired power plants in Japan [Text] / Md Habib Al Razi Khandakar, Hiroshi Moritomi // Atmospheric Pollution Research.– 2012 April. – Vol. 3, is. 2. – P. 226–237.

9. **Khamsimak, P.** Dispersion Modeling of SO_2 Emissions from a Lignite Fired Thermal Power Plant using CALPUFF [Text] / P. Khamsimak, S. Koonaphapdeelert, N. Tippayawong // Energy and Environment Research. – 2012. – Vol. 2, No. 2. – P. 256–264.

10. **Vairo, T.** Atmospheric Emissions from a Fossil Fuel Power Station: Dispersion Modelling and Experimental Comparison [Text] / T. Vairo, F. Curro, S. Scarselli // A publication of The Italian Association of Chemical Engineering. – 2014. – Vol. 36. – P. 15–28.

11. **Palazzi, E.** Analytical modelling of hydrocarbon pool fires: Conservative evaluation of flame temperature and thermal power [Text] / E. Palazzi, B. Fabiano // Process Safety and Environmental Protection. – 2012. – Vol. 90. – P. 121–128.

Надійшла до редколегії 12.06.2016