

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАГАЗОВАННОСТИ АТМОСФЕРЫ ОТ ВЫБРОСОВ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Волков Э. П.

Кафедра тепловых электростанций Московского Энергетического Института

Поступило: 12 мая 1981 г.

Представлено: проф. д-р Сабо И.

В дымовых газах, выбрасываемых в атмосферу тепловыми электростанциями, содержится значительное количество золы, сернистого ангидрида и окислов азота, поэтому проектирование и эксплуатация ТЭС должны вестись с обязательным учетом требований по охране воздушного бассейна. Большое значение для соблюдения этих требований имеет наличие достоверных методик расчета концентраций вредных примесей на уровне дыхания людей. Наиболее полно такие методики были разработаны в Главной Геофизической Обсерватории им. Воейкова А. Е. [1], на базе которых созданы указания по расчету рассеивания в атмосфере вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий (СН 369—74). Концентрации вредных примесей на уровне дыхания людей, рассчитываемые согласно указаниям, соответствуют максимально-разовым при условии, когда технологические (режимные) и метеорологические факторы являются неблагоприятными. Однако в процессе эксплуатации ТЭС меняются как метеоусловия, так и режимы работы технологического оборудования. С изменением метеопараметров изменяется интенсивность турбулентности атмосферы, которая влияет на подъем дымового факела над устьем трубы и его рассеивание в атмосфере [2]. При этом необходимо отметить, что в случае высотных дымовых труб ($H > 250\text{м}$) и подключении на одну трубу больших мощностей ($N = 1000\text{ МВт}$ и выше) опасные скорости ветра имеют высокие значения ($u_{0н} = 9 - 10\text{ м/с}$). При таких высоких скоростях ветра наблюдается состояние слабой неустойчивости или безразличное состояние атмосферы. При скоростях ветра выше 11 м/с имеет место безразличное или устойчивое состояние атмосферы даже при больших градиентах температуры по высоте [3]. Отсюда следует, что для мощных ТЭС достаточно длительное время в году условия для рассеивания вредных примесей в атмосфере более благоприятные, чем принятые при проектировании, и баланс по топливу можно в этих случаях смещать в сторону ухудшения его состава, и наоборот — при особо неблагоприятных метеоусловиях, использовать низкосернистое

топливо для регулирования уровня загазованности приземного слоя атмосферы.

Однако при этом мы должны контролировать загазованность атмосферы либо с помощью приборов, установленных в районе расположения ТЭС, либо путем расчета концентраций вредных примесей при различных метеорологических и режимных условиях.

Отсюда потребность в математической модели расчета концентраций вредных примесей при различных метео и технологических параметрах, апробированной в натуральных условиях. Структура модели вытекает из рассмотрения физических процессов распространения дымового факела. При выходе факела из трубы за счет начального импульса движения и тепла, содержащегося в уходящих газах, происходит подъем факела над устьем трубы и одновременно его расширение в атмосфере за счет турбулентных пульсаций. Данную сложную картину часто заменяют расчетной, для чего, определяют подъем факела в атмосфере, заменяют реальный источник условным, точечным. Для определения высоты подъема факела существует значительное количество формул, которые не всегда коррелируют между собой [4]. В Московском энергетическом институте были проведены исследования гидродинамической и тепловой составляющих подъема факела в аэродинамической трубе и натурные эксперименты на действующих станциях, в результате которых получены расчетные соотношения для определения подъема факела над устьем труб при различных метеорологических и режимных параметрах, позволяющие обобщить большинство из имеющихся формул [2, 5].

При конечной скорости распространения примеси угол раскрытия факела определяется интенсивностью турбулентности, возникающей при взаимодействии факела со сносящим потоком на начальном участке подъема факела (гидродинамический подъем) и интенсивностью турбулентности атмосферы в конечной стадии подъема факела (тепловой подъем). Если при упрощенном подходе принять, что интенсивность турбулентности в вертикальной плоскости вдоль всей траектории движения факела постоянна и определяется вертикальной составляющей интенсивности турбулентности атмосферы — ε_z , то границы факела при его расширении определяются достаточно просто.

Из рассмотрения средней траектории движения можно записать уравнение средней линии подъема факела [5]

$$z = K\kappa^n, \quad (1)$$

где

$$\kappa = \sqrt{0,42 \frac{w_0 D_0}{u} + 0,3 \frac{g w_0 D_0^2 \Delta T}{u^3 \varepsilon_y T_r}}$$

Здесь w_0 , u — соответственно скорость выхода газов из устья трубы и скорость ветра; D_0 — диаметр устья трубы; ΔT — перепад температур между выбрасываемыми газами и окружающей средой на уровне устья трубы; T_r — температура газов на выходе из трубы; ε_y — поперечная составляющая интенсивности турбулентности атмосферы в зоне подъема факела; n — показатель степени (в случае $\frac{\kappa}{D} \leq 120$ $n=0,5$, при $\frac{\kappa}{D} > 120$ $n=0,35$). Тогда выражение для нижней границы факела, обусловленной конечной скоростью распространения примесей, запишется в виде

$$z = h + K\kappa^n - \varepsilon_z \kappa \quad (2)$$

где h — геометрическая высота газоотводящей трубы. При условии $z=0$ получаем точку касания земли нижней границей факела. В случае $n=0,5$

$$X_3 = \frac{K^2 + 2h\varepsilon_z + K\sqrt{K^2 + 4h\varepsilon_z}}{2\varepsilon_z^2} \quad (3)$$

Подъем факела над устьем трубы определяется как разница между точкой средней траектории движения факела А и верхним обрезом газоотводящей трубы по вертикали в месте касания нижней границей факела земли. Поместив на этой высоте точечный источник, при условии изотропной в вертикальной плоскости атмосферы ($\varepsilon_z = \text{const}$), мы будем иметь поля концентраций пассивных примесей примерно одинаковые от точечного и реального источников.

В действительности данная схема расчета полностью соблюдаться не будет, во-первых из-за того, что интенсивность турбулентности на начальном участке подъема факела выше интенсивности турбулентности атмосферы и во-вторых из-за наличия приземного слоя земли, интенсивность турбулентности которого уменьшается при приближении к поверхности земли [6]. Однако эти два фактора, действуя одновременно, приводят к коннервации полей концентраций на уровне дыхания людей, т. к. из-за увеличения реальной интенсивности турбулентности на первой фазе подъема, концентрации вредных примесей на уровне дыхания людей должны уменьшаться, а из-за уменьшения интенсивности турбулентности в приземном слое земли, их концентрации увеличатся. В первом приближении можно принять, что максимальные величины концентрации по расчетной схеме и в реальности будут одинаковы.

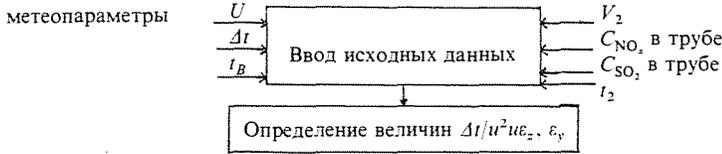
Заменив реальный источник точечным, поля концентраций просто рассчитать, воспользовавшись для этого методикой Главной Геофизи-

ческой Обсерватории или Института экспериментальной метеорологии. Данные методики позволяют рассчитать поля концентраций, либо приняв модель Юдина и Швепа для изменения коэффициентов турбулентного обмена K_z и модель Берлянда для величины K_y с использованием приземных замеров метеопараметров (методика ГГО) [1], либо с использованием дисперсии примеси на основе обширных натурных экспериментов на 300-метровой метеовышке, проведенных под руководством Бызовой Н. Л. (методика ИЭМ) [7].

Математическая модель для расчета концентраций газообразных выбросов при различных состояниях атмосферы и нагрузках ТЭС представляет собой увязанную формулировку задач определения подъема факела и расчета концентраций вредных примесей, при условии задания необходимого числа исходных параметров. В нашем случае — это исходные концентрации вредных примесей в уходящих газах (непосредственно в газоотводящих трубах), метеопараметры в слое рассеяния примеси (высотные замеры) и характеристика интенсивности перемешивания продуктов сгорания с окружающим воздухом (интенсивность турбулентных пульсаций в вертикальном и поперечном ветру направлениях ε_z и ε_y). Последние характеристики атмосферы могут быть определены по скорости ветра и вертикальному градиенту температур, пользуясь введенным М. И. Будыко параметром $B = \frac{\Delta t}{u^2}$ [2].

Математическая модель для расчета концентраций газообразных выбросов при различных состояниях атмосферы и нагрузках ТЭС представлена ниже (в данном случае для расчета полей концентраций использована модель института экспериментальной метеорологии), (см. на следующей стр.).

Зная исходные величины, модель просто реализовать с помощью ЭВМ для получения полей концентраций пассивных примесей. Для проверки предложенной математической модели и исследования концентраций газообразных инградиентов при выбросах из высотных труб мощных ТЭС, на тепловой электростанции общей мощностью 3600 МВт с трубами высотой 320 м были проведены комплексные натурные эксперименты. Одновременно фиксировались характеристики выбросов через дымовые трубы ГРЭС, метеорологические параметры, положение дымового факела и концентрации газообразных ингредиентов на уровне дыхания людей. Кроме Московского энергетического института (головная организация) в натурных исследованиях принимали участие Главная Геофизическая обсерватория им. Воейкова А. И., институт сангигиены им. Эрисмана Ф. Ф., Новосибирский научно-исследовательский институт прикладной геодезии, Энергетический институт им. Кржижановского Г. М. и другие организации.



расчет подъема факела

$$\Delta h = KX_3^{0.5} \text{ при } \frac{X_3}{D_0} \leq 120; \Delta h = 2KD_0^{0.15}(X_3)^{0.35} \text{ при } \frac{X_3}{D_0} > 120$$

$$K = \sqrt{0,42 \frac{W_0 D_0}{U} + 0,3 \frac{g W_0 D_0^2 \Delta T}{T_r U^3 \varepsilon_y}}$$

$$X_3 = \frac{K^2 + 2h\varepsilon_z + K\sqrt{K^2 + 4h\varepsilon_z}}{2\varepsilon_z^2}, \text{ при } \frac{X_3}{D_0} \leq 120$$

$$X'_3 = X_3 - \frac{KX_3^{0.5} - 2KX_3^{0.35}D_0^{0.15}}{\varepsilon_z}, \text{ при } \frac{X_3}{D_0} > 120$$

Определение концентрации SO_2 и NO_x

$$C_{(x,y)} = \frac{M e^{-\frac{R}{x} - \frac{y^2}{2\sigma^2(x)}}}{\Gamma(1+\rho)\sqrt{2\pi}\sigma(x)UH} \left(\frac{R}{x}\right)^\rho;$$

$$R = \frac{CH}{B}; B = \frac{ku}{H}; \Gamma(1+\rho) \text{ — Гамма функция}$$

где M — количество вредных выбросов, г/с;

H — эффективная высота трубы, м;

$\sigma(x)$ — дисперсия примеси в поперечном ветру направлении;

C, ρ — постоянные параметры, зависящие от класса устойчивости атмосферы;

K — среднее в слое значение коэффициента турбулентной диффузии атмосферы, м²/с;

y — поперечная ветру координата, м;

Δt — вертикальный градиент температур в атмосфере, °С;

t_b — температура воздуха, °С;

C_{NO_x}, C_{SO_2} — соответственно концентрации окислов азота и серы в уходящих газах, мг/м³;

V_2 — объемный расход газов, м³/с.

В экспериментах проводился тщательный контроль всех основных параметров. Объемы выбрасываемых газов замерялись прямыми замерами в газоотводящих трубах цилиндрическим термоанемометром, вводимым через специальный люк на отметке 75 м [8]. Концентрации окислов азота замерялись независимо двумя приборами — ГХ—4 и «Эвдиометр—1» (прибор, разработанный в ЭНИН им. Кржижановского Г. М. [9]). Метеорологические параметры замерялись датчиками, установленными на ажурной мачте высотой 45 м на отметках 0,5 м, 2 м, 23 м, 45 м. Температурный градиент в атмосфере замерялся кроме того автоматической системой, датчиками в которой использовались термометры сопротивления, установленные на светофорных площадках дымовой трубы на отметках 30 м, 100 м, 200 м и 270 м и с помощью самолетных и вертолетных зондировок. Результаты замеров скорости ветра на различных отметках мачты показали, что логарифмический закон распределения ветра по высоте далеко не всегда соответствует его реальному распределению. Это говорит о необходимости для системы контроля загрязнения атмосферы иметь специальную метеорологическую вышку или высотную метеостанцию. Во время проведения экспериментальных исследований параметры работ и количество выбросов от 1 очереди (4 блока по 300 МВт) изменялись в следующих пределах $N = 710 - 1145$ МВт; расход топлива $B = 300 - 490$ т/ч; $t_{yx} = 137 - 164$ °С; сернистость топлива $S^p = 1,53 - 2,39$ %; концентрация окислов азота в уходящих газах $0,9 - 1,25$ Г/м³; выбросы сернистого ангидрида $M_{SO_2} = 2480 \div 5330$ г/с и окислов азота $M_{NO_x} = 650 \div 1760$ г/с. Пределы изменения соответствующих величин по второй очереди (2 блока по 800 МВт):

$$N = 600 - 1520 \text{ МВт}; \quad B = 153 - 368 \text{ т/ч}; \quad t_r = 155 - 172 \text{ °С}$$

$$S^p = 1,8 - 2,5 \text{ \%}; \quad C_{NO_x} = 0,5 - 0,835 \text{ Г/м}^3 \quad M_{SO_2} = 1650 - 1900 \text{ г/с}$$

$$M_{NO_x} = 491 - 1270 \text{ г/с}.$$

На рис. 1 приведены экспериментальные данные по распределения концентраций окислов серы (1а, б) и азота в пересчете на NO₂(1б) на уровне дыхания людей в зависимости от источника выбросов и расчетные кривые. Из представленных графиков можно сделать вывод, что предлагаемая математическая модель удовлетворительно описывает реальные поля концентраций вредных примесей. Максимальные значения концентраций, полученные в натурных экспериментах удовлетворительно согласуются с величинами, рассчитанными по методике СН 369—74. Максимальные концентрации окислов азота по данным замеров превышают предельно-допустимые в 1,1 ÷ 1,4 раза. С учетом суммации воздействия окислов серы и азота их концентрации в экстремальных

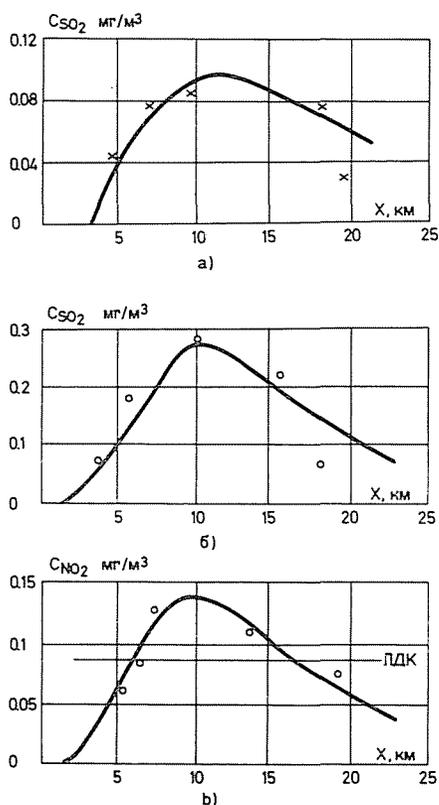


Рис. 1. Распределение концентраций SO_2 и NO_2 в зависимости от расстояния до дымовой трубы. —распределение по предлагаемой математической модели; о экспериментальные точки при неустойчивом состоянии атмосферы; х экспериментальные точки при безразличном состоянии атмосферы

случаях превышают предельно-допустимые. Необходимо однако заметить, что при суммировании вредностей концентрации NO_x определялись в предположении, что все окислы азота существуют в виде NO_2 . На самом деле, как показали замеры непосредственно в газоотводящих трубах и в зоне расположения максимума концентраций на уровне дыхания людей, имеется определенное соотношение между окислами азота в виде монооксида NO и двуоксида NO_2 , которое не остается постоянным.

На рис. 2 показано изменение концентрации двуоксида азота и суммарной концентрации окислов азота по газовому тракту котлоагрегата ТПП—312А. Измерения величин в сечениях на входе в водяной экономайзер, за дымососом и на входе в дымовую трубу. Из рассмотрения графика видно, что концентрация NO_2 в дымовых газах практически не изменяется по газовому тракту и составляет 6—8% от концентраций

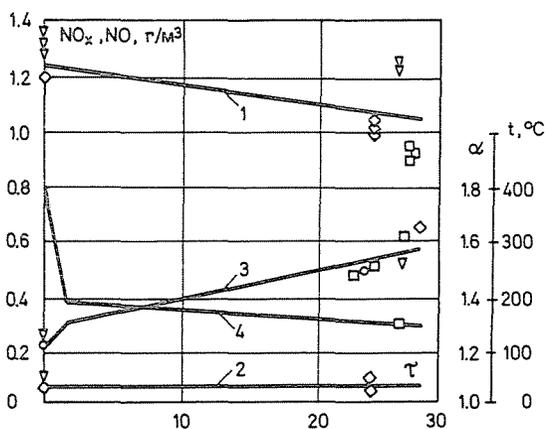


Рис. 2. Изменение концентрации окислов азота по газовому тракту котлоагрегата ТПП—312А. 1 — суммарная концентрация окислов азота; 2 — концентрация NO_2 ; 3 — избытки воздуха в дымовых газах; 4 — температура дымовых газов

NO_x . Концентрация NO_x незначительно уменьшается из-за увеличения избытка воздуха.

Степень окисления монооксида азота по газовому тракту парогенератора (за время около 30 с) изменяется незначительно, возрастая от 0,03 до 0,05. Таким образом, даже на выходе факела в атмосферу, содержание двуоксида азота не превышает 10% общего содержания окислов азота. Для полного изучения динамики превращения монооксида азота в двуокись после выхода факела из трубы необходимы специальные исследования при движении факела в атмосфере. Однако о результирующем эффекте можно судить по измерениям раздельно содержания NO и NO_2 на уровне дыхания людей в зоне максимума концентраций. Такие измерения, проведенные ГГО и институтом Сангигиены им. Эрисмана Ф. Ф. позволяют оценить долю NO_2 в зоне максимума концентрации (6–8 км от трубы) в 50–60%. Отсюда видна необходимость внести коррективы в расчет суммарной величины концентраций пассивных примесей. Кроме того, вышеприведенные результаты экспериментов получены в летнюю пору, когда условия турбулентного обмена и подъем факела неблагоприятны, что приводит к увеличению концентраций вредных веществ на уровне дыхания людей [1]. Величины приземных концентраций по замерам, проведенным во время эксперимента, колеблются даже в течении суток, увеличиваясь в полдень и уменьшаясь к вечеру. Это позволяет, воздействуя на технологические параметры и зная метеорологические условия, регулировать приземные концентрации, оставляя их в рамках предельно-допустимых.

В этом случае для снижения предельно-допустимых выбросов (ЦДВ) потребуется переходить на малосернистое топливо или снижать нагрузку на данной станции, увеличивая ее на других (производить перераспределение нагрузки), или подмеливать в дымовой трубе к газам подогретый воздух, снижая тем самым концентрации вредных ингредиентов в уходящих газах и одновременно увеличивая их расход, а следовательно скорость выхода газов из дымовой трубы и подъем дымового факела. Такого же эффекта можно достигнуть, увеличивая температуру газов в дымовой трубе, используя, например, дополнительную форсунку малой производительности, установленную непосредственно в газоотводящем стволе. Однако для применения того или иного метода снижения концентраций вредных ингредиентов на уровне дыхания людей требуется знание количественных соотношений. Такие результаты мы можем получить с использованием математической модели расчета концентраций пассивных примесей. В первую очередь представляет интерес влияние мощности подключенного к трубе оборудования на величины концентраций, в том числе и максимальные. Эта зависимость приведена на рис. За для различных состояний атмосферы, характеризующихся соотношением $\frac{\Delta t}{U^2}$, где U — средняя в слое скорость ветра Δt — градиент температуры в этом же слое [7].

Как видно из рассмотрения графика, величина концентрации вредных газообразных примесей, имеет относительно слабую зависимость от подключенной к трубе мощности. Связано это с тем фактором, что одновременно с уменьшением количества выбросов вредных примесей (при уменьшении нагрузки), уменьшается подъем дымового факела над устьем трубы из-за чего величины концентраций примеси в значительной мере консервируются.

Для безразличного состояния атмосферы изменение максимальных концентраций примеси с изменением мощности незначительные (с 0,025 до 0,035 мг/м³ при изменении мощности с 300 до 2400 МВт при общем их невысоком уровне (линия $n = 3$)).

Объясняется это невысокой степенью интенсивности турбулентности атмосферы, малым углом раскрытия факела и отсюда и значительной зоной переброса и относительно большим временем движения облака до поверхности земли.

В условиях неустойчивого состояния атмосферы (линия $h = 1$ и 2) эти изменения уже существеннее (в два раза при тех же изменениях мощности). Этот факт говорит о том, что, изменяя нагрузку станции, мы можем, хотя и в определенных пределах, воздействовать на уровень концентраций газообразных примесей при неблагоприятных метеоусловиях (неустойчивом состоянии атмосферы).

Зависимость концентраций вредных примесей от температуры уходящих газов более существенная и можно при определенных состояниях атмосферы использовать данный параметр для регулирования величины концентраций. Так при изменении t_{yx} со 150 до 350 °С концентрации примесей при неустойчивом состоянии атмосферы уменьшаются на 25%. В данном случае на изменение концентраций воздействуют гравитационные силы. Безусловно для осуществления регулирования величины концентраций необходимо провести определенные мероприятия, т. к. увеличение t_{yx} путем изменения режима работы парогенератора приведет к неоправданному снижению к. п. д. его работы и перерасходу топлива. Повышение температуры уходящих газов можно достигнуть или вводом горячего воздуха после воздухоподогревателя в трубу, или с помощью дополнительной форсунки, установленной в нижней части газоотводящей трубы.

Большое влияние на уровень концентраций газообразных примесей оказывает сернистость топлива. На рис. 3б показано влияние сернистости топлива на величину приземных концентраций газообразных примесей, откуда видно, что при изменении сернистости топлива при любых метеоусловиях концентрации примесей значительно изменяются.

Во всех представленных вариантах отражено влияние метеоусловий на величины концентраций, как влияние различных состояний атмосферы. Графики построены для трех состояний атмосферы (неустойчивое,

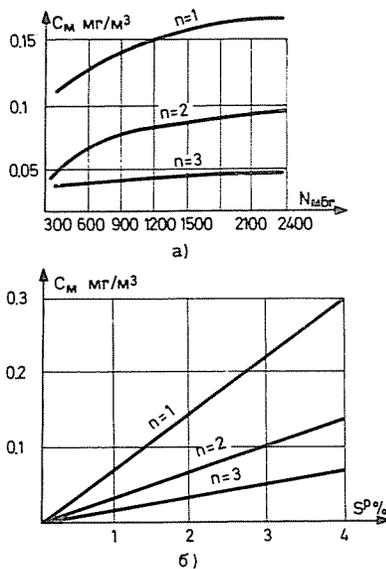


Рис. 3. Влияние подключённой к трубе мощности и сернистости топлива на максимальные концентрации SO_2 в приземном слое атмосферы. $n=1$ — неустойчивое состояние атмосферы; $n=2$ — слабая неустойчивость; $n=3$ — безразличное состояние атмосферы

слабая неустойчивость и безразличное), которые наблюдались во время экспериментов и характеризуются различными значениями $\frac{\Delta t}{u^2}$. Конечно важным является поведение факела и распространение примеси при особо неблагоприятных условиях, какими являются мощные инверсии, интенсивный конвективный массообмен при штиле и т. д. По этому поводу необходимо отметить, что достаточных экспериментальных данных пока не имеется. Связано это и с тем, что по целому ряду обстоятельств, эксперименты проводились в летнее время, когда такие условия в данном районе встречаются весьма редко (по данным метеонаблюдений на окрестных метеостанциях) и с трудностью, без системы автоматического контроля, зарегистрировать такие состояния. Предварительно можно утверждать, что инверсии на уровне 200 – 250 м, встречающиеся кратковременно в утренние и вечерние часы, оказывают положительное влияние на рассеивание примесей, т. к. из-за большой высоты трубы инверсионный слой не влияет на подъем факела и незначительно препятствует его быстрому опусканию из-за уменьшения величины E_z и относительного увеличения E_y по отношению к E_z . Высокие инверсионные слои наблюдались за время экспериментов несколько раз, были не слишком мощными и дымовой факел большой тепловой мощности практически без существенных изменений траектории проходил эти слои, в результате чего инверсионный слой не оказывал своего обычного влияния на распространение факела. В дальнейшем, этот интересный случай требует детального изучения с использованием высотных замеров градиента температур.

Таким образом, полученные зависимости уровня концентраций вредных примесей от различных факторов помогают проанализировать основные функциональные связи между технологическими величинами, метеопараметрами и величиной концентраций пассивных примесей и обоснованию подойти к разработке мероприятий по снижению концентраций вредных ингредиентов в необходимых случаях.

Резюме

Для расчета распределения концентрации газообразных примесей от теплоэлектростанций разработана математическая модель, учитывающая разные эксплуатационные и метеорологические условия. Результаты расчетов были проверены экспериментально, в зависимости от технологических и метеорологических параметров. Работа содержит краткое описание расчетной модели, а также результаты натурных испытаний в зоне теплоэлектростанции, определяя модельные параметры в зависимости от них.

Литература

1. Берлянд М. Е.: «Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы». Гидрометеиздат, Л., 1975.
2. Волков Э. П., Грибков А. М., Сапаров М. И.: Распространение дымового факела в процессе эксплуатации тепловой электростанции». Теплоэнергетика, 1979, № с. 33—37.
3. Елисеев В. С.: Стереофотографическое исследование структуры воздушного потока в нижней части пограничного слоя атмосферы. тр./ГГО, 1975, вып. 352, с. 47—58.
4. Рихтер Л. А., Волков Э. П., Кормилицын В. И.: «Тепловой подъем газов из дымовых труб ТЭС». Теплоэнергетика, 1973, № 2 с. 52—57.
5. Волков Э. П.: Исследование подъема факела над устьем газоотводящих труб, Инж-физ, журнал, том XXXVI, 1979, с. 700—707.
6. Шаропилотные исследования структуры ветра с использованием ЭБМ, Тр./САРНИТМИ, Гидрометеиздат, Л. 1973, вып. 6(87), с. 57.
7. Бызова Н. Л.: Методическое пособие по расчету рассеяния примесей в пограничном слое атмосферы, Гидрометеиздат. М. 1973.
8. Лельчук В. А., Эткин В. Б.: Исследование возможности измерения запыленного газового потока продольно омываемым цилиндрическим термоанемометром, Теплоэнергетика, 1975, № 10, с. 72—74.
9. Кормилицын В. И., Тишина Т. А.: «Определение концентрации окислов азота в дымовых газах ТЭС, Сб. «Механизм образования и методы подавления окислов азота в процессах горения топлива», Киев, Знание, 1978, с.

Волков, Э. П. МЭИ, Москва, Красноказарменная 14, СССР