

1. Луцкая Н.Н., Ладанюк А.П. Использование оптимальных регуляторов для многомерных технологических объектов // Проблемы управления и информатики. – 2007. – № 2. – с. 56-63.

2. Пупков К.А., Егупов Н.Д. Методы робастного, нейронечеткого и адаптивного управления. – М.: Изд-во МГТУ, 2001. – 744с.

УДК 628.543.49

МІНІМІЗАЦІЯ ТОКСИЧНОСТІ ПРОДУКТІВ ЗГОРАННЯ ТА ВТРАТ ТЕПЛОТИ У ТОПКОВИХ ПРИСТРОЯХ З РЕЦИРКУЛЯЦІЄЮ ПРОДУКТІВ ЗГОРАННЯ НА ОСНОВІ УЗАГАЛЬНЕНОГО КРИТЕРІЮ ОПТИМІЗАЦІЇ

Бакшанська Т.Д., Рижиков Ю.Г., Тодорцев Ю.К.

Оптимізація процесу спалювання природного газу за допомогою сучасних систем автоматичного управління горінням з корекцією за вмістом кисню або продуктів недопалу, які виходять з топкових пристроїв, будуються з урахуванням утворення в процесі горіння токсичних компонентів продуктів згорання [1]. Додатковим регулюючим впливом в таких системах крім співвідношення „паливо-повітря” може бути рециркуляція продуктів згорання [2].

Таким чином, задача управління процесом горіння може бути класифікована як багатокритеріальна, а система управління, яка реалізує цю задачу може бути віднесена до оптимальних МІМО – систем.

Згортка критеріїв на основі узагальненого критерію оптимізації, вираженого через склад продуктів згорання має вид:

$$I = \sqrt{(I_E - I_E^*)^2 + (I_T - I_T^*)^2} \quad (1)$$

де $I_E = \frac{H_2}{H_2^{\text{дон}}} + \frac{CO}{CO^{\text{дон}}} + \frac{O_2}{O_2^{\text{дон}}}$ - локальний критерій, що характеризує економічність процесу горіння,

H_2 , CO , O_2 - концентрація водню, оксиду вуглецю та кисню у димових газах;

$H_2^{\text{дон}}$, $CO^{\text{дон}}$, $O_2^{\text{дон}}$ - допустимі значення концентрацій відповідних компонентів.

$I_T = \frac{CO}{CO^{\text{ГПВ}}} + \frac{NO}{NO^{\text{ГПВ}}}$ - локальний критерій, що характеризує токсичність процесу горіння,

де CO , NO - поточне значення оксиду вуглецю та оксиду азоту; $CO^{\text{ГПВ}}$, $NO^{\text{ГПВ}}$ - гранично допустимі викиди відповідних компонентів;

I_T^* , I_E^* - значення критеріїв мінімізації при вирішенні приватних задач:

$$I_E \rightarrow \min \quad (2)$$

$$I_T \rightarrow \min \quad (3)$$

Критерій (1) має сенс мінімальної відстані між крапкою в просторі приватних критеріїв і „ідеальною крапкою” $I^* = (I_T^*, I_E^*)$ [3].

Процедура пошуку оптимального за співвідношенням „паливо - повітря”, яке визначається коефіцієнтом надлишку повітря α з рециркуляцією продуктів згорання режиму горіння при виборі критерію у формі (1) складається з двох етапів.

По-перше, визначити координати „ідеальної” крапки I^* у просторі приватних критеріїв, тобто вирішення приватних задач (2), (3).

По-друге, вирішити задачу мінімізації узагальненого критерію $I(1)$, з урахуванням зв'язків у виді математичної моделі, яка побудована за допомогою метода розрахунку рівноважних продуктів реакцій, що дозволяє отримати достатньо докладний склад димових газів [4]. Математична модель є системою з трьох груп рівнянь хімічної рівноваги: рівнянь дисоціації, матеріального балансу та рівняння закону Дальтона. Для розрахунку температури горіння ці рівняння необхідно доповнити рівнянням енергетичного балансу топкового пристрою [5].

Усі складові узагальненого критерію оптимізації вимагають знання практично повного складу димових газів. Для дослідження процесу горіння з рециркуляцією продуктів згорання використовувалась модель горіння природного газу Шебелинського родовища [2] в топці котла парогазового блоку потужністю 250 МВт.

Для визначення токсичної складової I_T векторного критерію I необхідно визначити значення ГПВ токсичних компонентів.

Величина ГПВ визначена з вираження, яке виведено з формули для розрахунку висоти димаря [6]:

$$H = \left(\frac{A \cdot M \cdot F \cdot m \cdot n}{ГПК_q} \cdot \sqrt[3]{\frac{z}{V_1 \cdot \Delta T}} \right)^{0.5} \quad (4)$$

Прийнявши сумарну кількість шкідливої речовини, що викидається в атмосферу M рівним ГПВ, можна за допомогою формули (4) вирішити зворотну задачу: якими повинні бути викиди при відомій висоті димаря, щоб концентрація токсичної речовини в зоні викидів не перевищила ГПК. При цьому одержимо вираз

$$C_q^{ГПВ} = \frac{ГПК_q \cdot H^2}{A \cdot F \cdot m \cdot n} \cdot \sqrt[3]{\frac{V_1 \cdot \Delta T}{z}} \quad (5)$$

де H – висота димаря, м;

$ГПК_q$ – гранично припустимі концентрації q -го компонента, що лімітує чистоту повітряного басейну; A – коефіцієнт, який залежить від температурної стратифікації атмосфери для несприятливих метеорологічних умов, що визначає умови вертикального і горизонтального розсіювання шкідливих речовин в атмосферному повітрі;

F – коефіцієнт, який враховує вплив швидкості осадження домішок (для газоподібних шкідливих речовин $F=1$);

m, n – коефіцієнти, що враховують умови виходу газоповітряної суміші з устя джерела викиду;

V_1 – об'ємна витрата газів, що ідуть, що викидаються $м^3/с$;

z – число димарів однакової висоти, установлених на електростанції.

Коефіцієнт m визначається в залежності від параметра f

$$m = (0.67 + 0.1\sqrt{f} + 0.34\sqrt[3]{f})^{-1} \quad (6)$$

Де f :

$$f = \frac{10^3 \cdot w_0^2 \cdot D_0}{H^2 \cdot \Delta T} \quad (7)$$

де ΔT – різниця між температурою газів, що виходять з топкових пристроїв, і середньою температурою повітря T_H , під якою розуміють середню температуру самого жаркого місця опівдні, $^{\circ}C$;

D_0 – діаметр устя димаря, м;

w_0 – швидкість виходу газів з устя димаря, м/с.

Коефіцієнт n визначається в залежності від параметра V_M

$$V_M = 0.65 \cdot \sqrt[3]{\frac{V_1 \cdot \Delta T}{H}} \quad (8)$$

при $V_M = 0.3, n = 3,$

при $0.3 < V_M \leq 2$, $n = 3 - \sqrt{(V_M - 0.3) \cdot (4.36 - V_M)}$,

при $V_M > 2$, $n = 1$.

Аналіз залежностей (4) – (8) показує, що основними факторами, які впливають на величину ГПВ токсичних компонентів, є навантаження котла, коефіцієнт надлишку повітря α , ступень рециркуляції та кількість котлів, що викидають продукти згорання в один димар.

Схема алгоритму розрахунку ГПВ токсичних компонентів за рівняннями (4) – (8) представлена на рисунку 1.

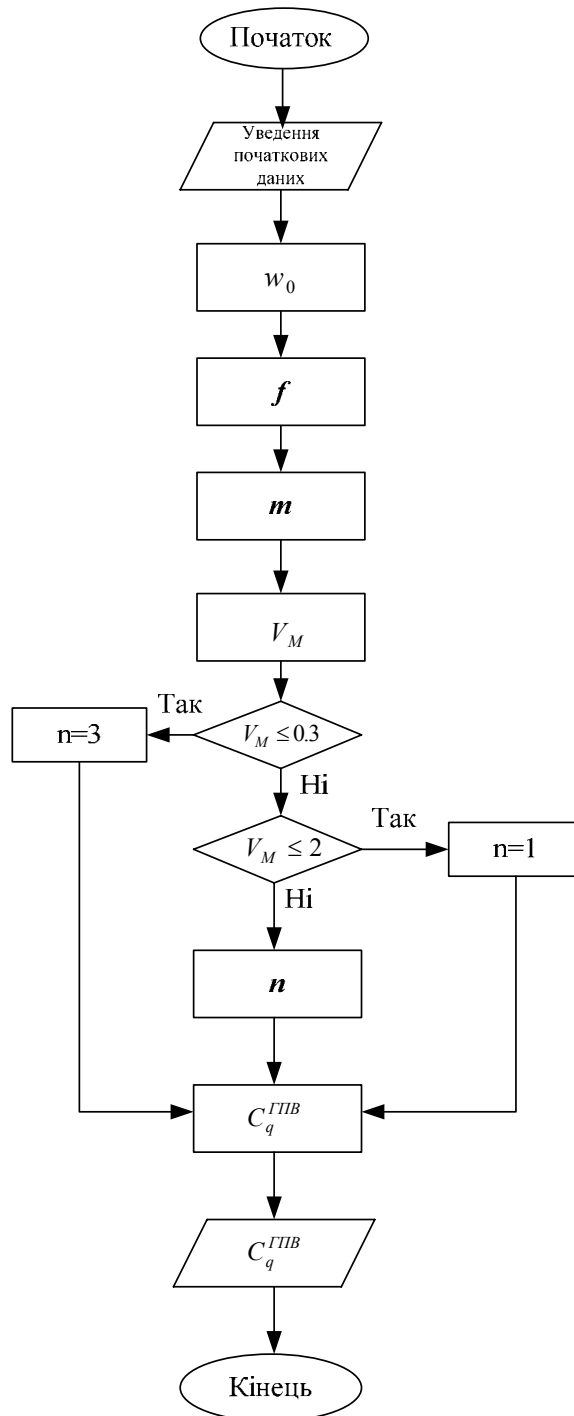


Рис. 1 Алгоритм розрахунку ГПВ токсичних компонентів димових газів

Приклад залежності ГПВ від коефіцієнту надлишку повітря при горінні у повітрі та з рециркуляцією продуктів згорання, приведені на рисунку 2.

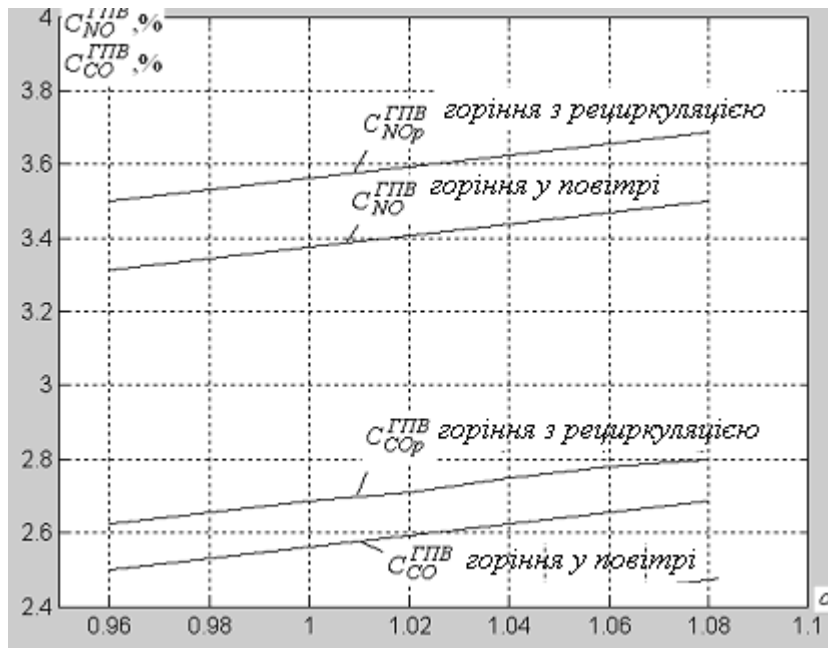


Рис. 2 Залежність гранично припустимих викидів (ГПВ) токсичних компонентів продуктів згорання від коефіцієнта надлишку повітря при горінні у повітрі та з рециркуляцією продуктів згорання

Як видно з рисунку 2, ГПВ токсичних компонентів димових газів лінійно залежать від коефіцієнта надлишку повітря α при горінні у повітрі та з рециркуляцією продуктів згорання, крім того, вплив α на зміну ГПВ незначний, що дозволяє прийняти значення ГПВ постійними для всієї області змін α . У зв'язку з тим, що оптимальне значення α^* лежить в області, близької до $\alpha=1$, значення ГПВ варто вибирати відповідно цієї області.

Вибір вектора допустимих значень концентрацій для нормалізації I_E здійснюється з рішення задачі мінімізації паливних утрат $q = q_2 + q_3$

$$q(\alpha) \rightarrow \min \tag{9}$$

за умови, що $q_3 \leq q^{don}$.

Тут q_2 і q_3 – відносні втрати тепла відповідно з газами, що викидаються, і хімічним недопалом, q_3^{don} – припустиме значення втрат тепла з хімічним недопалом, α – коефіцієнт надлишку повітря.

Втрати тепла з газами, що викидаються, q_2 , або фізичне тепло продуктів горіння, що залишають агрегат, залежать в основному від температури газів і їхнього об'єму. Чим нижче температура газів, що виходять з топкового пристрою, тим менше тепла буде втрачатися з ними, тому варто прагнути до зниження в розумних межах цієї температури.

Втрати тепла з газами, що викидаються, при спалюванні палива з надлишком повітря ($h > 1$) визначаються за формулою

$$q_2 = \frac{Q_2}{Q_p^p} \cdot 100 = \frac{Q_{y2} - \alpha_{y2} \cdot Q_{x8}^0}{Q_p^p} \cdot 100, \% \tag{10}$$

де Q_p^p — тепло на 1 кг палива;

Q_{y2} — ентальпія газів, що виходять з топкових пристроїв при відповідном коефіцієнті надлишку повітря α та температури газів, що виходять ϑ_{y2} ;

Q_{x8}^0 - ентальпія холодного повітря, що поступає у котел.

$$Q_{y2} = (V_{cz} \cdot C_{cz} + V_{ВП} \cdot C_{ВП}) \cdot \vartheta_{y2} \tag{11}$$

де V_{cz} та $V_{ВП}$ - об'єми сухих газів та водяної пари в газах, що виходять з топкових пристроїв;

C_{cz} та $C_{ВП}$ - теплоємність сухих газів та водяної пари.

$$Q_{xв} = (C_{xв} \cdot t_{xв} + 0.0016 \cdot d_B \cdot i_{xв}) \cdot V^0 \alpha \quad (12)$$

де $C_{xв}$, $t_{xв}$ - теплоємність та температура холодного повітря;

d_B - вологовміст сухого повітря;

$i_{xв}$ - ентальпія водяної пари;

V^0 - теоретично необхідна кількість повітря для спалювання 1 кг палива.

Значення відповідних втрат від хімічної неповноти згорання визначаються по вмісту продуктів недопалу (CO, H_2) у димових газах [3]

$$q_3 = \frac{Q_3}{Q_p^p} = \frac{V_{cz} (30.18 \cdot CO + 25.79 \cdot H_2)}{Q_p^p} \cdot 100\% \quad (13)$$

Усі значення величин, що входять до рівнянь (10)...(13) можуть бути визначені з математичної моделі процесу горіння [2]. Виключення складає температура димових газів ϑ_{yz} , яка визначається вимірюванням безпосередньо на об'єкті.

Аналіз залежності втрат теплоти від коефіцієнта надлишку повітря при горінні у повітрі та з рециркуляцією продуктів згорання показує, що значення α , оптимальне з погляду мінімуму суми втрат $q_2 + q_3$, не залежить від ϑ_{yz} , тому що залежність $q_2(\alpha)$ лінійна за α , а $q_3(\alpha)$ не залежить від ϑ_{yz} . Отже, рівність нулю похідної $d(q_2 + q_3)/d\alpha$ досягається при тому самому значенні α . Ця обставина дозволяє визначити припустимі значення концентрацій H_2^{don} і CO^{don} , що характеризують втрати окислювача, у такий спосіб:

$$H_2^{don} = \arg \min q(H_2, CO, O_2, \alpha),$$

$$CO^{don} = \arg \min q(H_2, CO, O_2, \alpha),$$

$$O_2^{don} = \arg \min q(H_2, CO, O_2, \alpha).$$

На підставі математичного моделювання процесу горіння, вибору ГПВ токсичних компонентів, припустимих значень концентрацій компонентів продуктів згорання, що характеризують економічність процесу горіння проведені розрахункові дослідження залежності приватних критеріїв I_E , I_T та рециркуляції продуктів згорання від коефіцієнта надлишку повітря α .

Розрахунок приватних складових критерію оптимальності статичної оптимізації процесу горіння за алгоритмом, який розглянуто вище, є наведеним на рисунку 3.

Аналіз залежностей (рисунок 3) показує, що процеси горіння оптимальні з погляду економічності і зменшення викидів лежать в області значень $\alpha > 1$. Причому, для зниження токсичності димових газів необхідно зменшити α стосовно значення, що характеризує економічність процесу. Це дозволяє зробити попередній висновок про те, що керування горінням з урахуванням зменшення токсичності димових газів вимагає більшої точності ніж загальновідоме керування, яке здійснюється лише з урахуванням економічності процесу.

Після рішення задач (2) і (3), можна перейти до рішення задачі мінімізації узагальненого критерію I , що з урахуванням обмеження на припустимі втрати з хімічним недопалом записується в такий спосіб

$$I = \sqrt{(I_E - I_E^*)^2 + (I_T - I_T^*)^2} \rightarrow \min \quad (14)$$

Приклад рішення задач (2) – (3) і розрахованого на їх підставі узагальненого критерію (14) є наданим на рисунку 4.

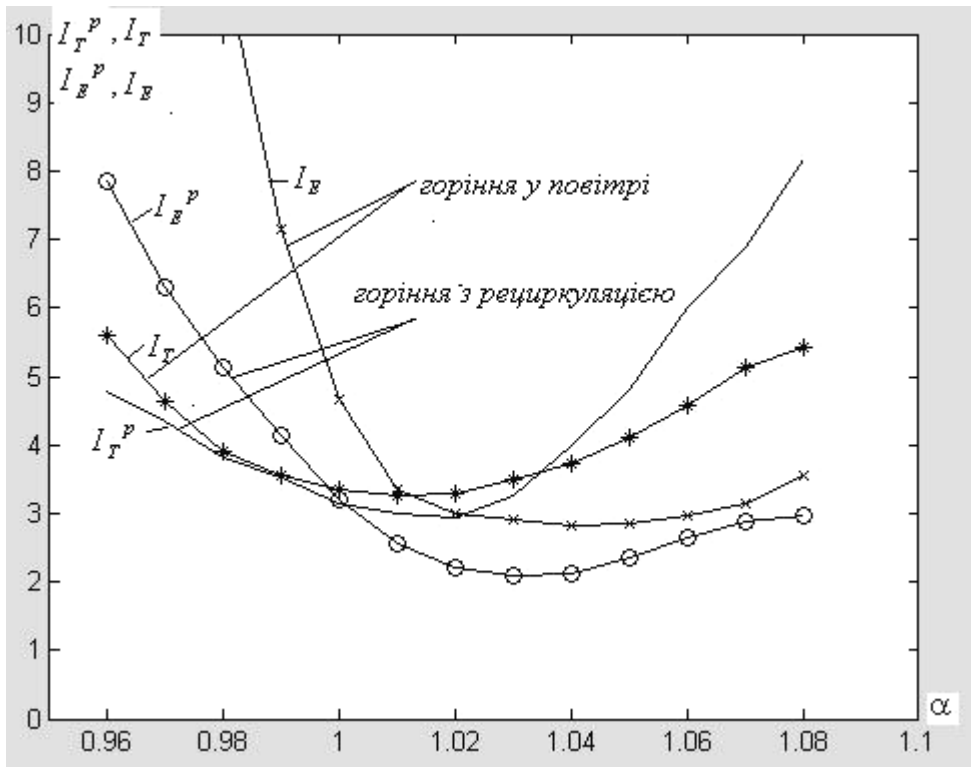


Рис. 3 Залежність приватних критеріїв від коефіцієнта надлишку повітря при горінні у повітрі та з рециркуляцією продуктів згорання

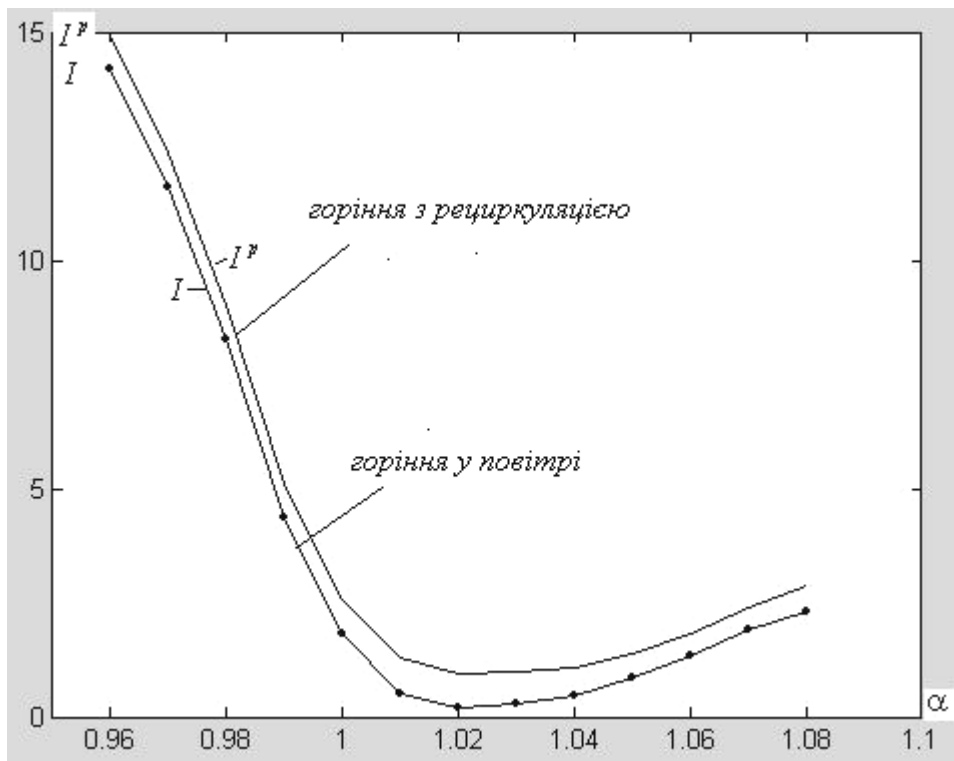


Рис 4 Залежність узагальненого критерію оптимізації від коефіцієнта надлишку повітря при горінні у повітрі та з рециркуляцією продуктів згорання

Аналіз залежності квадратичного узагальненого критерію від α , розрахованих для горіння в повітрі та з рециркуляцією продуктів згорання, показує, що область припустимих значень α істотно звужується порівняно з загальновідомим керуванням лише з урахуванням економічності процесу. Цей критерій найбільш чутливий до зміни α , і дає ком-

промисне рішення, найбільш близьке до „ідеальної” крапки I^* . Оптимальне значення коефіцієнту надлишку повітря α^* для розглянутих умов не змінюється. Узагальнений критерій для розглянутих умов є унімодальним, що дозволяє при вирішенні задачі оптимізації використовувати стандартні алгоритми.

In the paper the packaging procedure of private criteria which are characterized by the losses of heat in the furnace devices and diminishment of toxic components of products of combustion is explored solving the optimization problem of gas incineration from the recirculation of combustion products. The generalized criterion, for the examined terms, has only one extremum, that allows to use standard algorithms solving the optimization problem.

1. Бакшанская Т.Д., Рижиков Ю.Г., Тодорцев Ю.К. Регулирование экономичности процесса горения в топках паровых котлов. –Научно-технический сборник «Энергосберегающие технологии в теплоэнергетике - 2007». – Одесса.: 2007. – С.3-8.
2. Бакшанська Т.Д., Рижиков Ю.Г., Тодорцев Ю.К. Розрахункові дослідження процесу горіння природного газу з рециркуляцією продуктів згорання для цілей управління. - Автоматика, автоматизация, электротехнические комплексы и системы. – Херсон.: 2007. - №2 (20). - С. 44-52 .
3. Гаврилов В.М. Методы многокритериальной оптимизации.– М.:МАДИ, 1982.- 76с.
4. Киреев В.А. Методы практических расчетов в термодинамике химических реакций. – М. Химия, 1975.
5. Рыжиков Ю.Г., Тодорцев Ю.К. Минимизация токсичности выбросов при управлении сжиганием мазута в топках паровых котлов. Сб. научных трудов №109. – М. Моск. энерг. ин-т, 1986. С. 44-50.
6. Рихтер Л.А., Волков З.П., Покровский В.Н. Охрана водного и воздушного бассейнов от выбросов ТЭС. – М.: Энергоиздат, 1981. - 296 с