

Анализ процессов в системе ТЭЦ — открытая тепловая сеть с использованием модели реактора вытеснения с рециркуляцией

Чичиров А. А., Чичирова Н. Д., доктора хим. наук, Ляпин А. И., канд. техн. наук

Казанский государственный энергетический университет

Филиппов И. Е., канд. физ.-мат. наук

Казанский (Приволжский) федеральный университет

Представлено математическое описание процессов в системе ТЭЦ — открытая тепловая сеть. Система представляется как проточный реактор вытеснения с рециклом и описывается с использованием однопараметрической диффузионной модели. Получено аналитическое решение линейного однородного дифференциального уравнения второго порядка диффузионной модели в заданных граничных условиях. Проведено сопоставление расчетных и экспериментальных полей концентраций в действующей системе Набережночелнинская ТЭЦ — открытая теплосеть г. Набережные Челны.

Ключевые слова: однопараметрическая диффузионная модель, проточный реактор идеального вытеснения с рециклом, система ТЭЦ — открытая тепловая сеть.

В качестве объекта исследования выбрана действующая система ТЭЦ — открытая теплосеть в Набережных Челнах, структурная схема которой приведена на рис. 1. Пунктиром показано юридическое разделение зон ответственности между ТЭЦ и теплосетью.

Систему ТЭЦ — открытая теплосеть можно представить как проточный непрерывно действующий реактор. Поток сетевой воды от ТЭЦ в теплосеть — прямая сетевая вода, от теплосети на ТЭЦ — обратная сетевая вода. Большая часть сетевой воды возвращается на ТЭЦ (обратная сетевая вода, или рецикл). С установки химводоочистки ТЭЦ в

систему поступает подпиточная вода со своим химическим составом (входящий поток). Часть сетевой воды уходит на горячее водоснабжение, часть теряется с утечками в теплосети, а суммарно — это выход сетевой воды (выходящий поток). Теоретически возможны присосы воздуха и недеаэрированной воды (входящие потоки). По характеру теплообмена теплосеть — это неадиабатный реактор с внешним теплообменом. Температурный режим — изотермический. Существует градиент температур между прямой и обратной сетевой водой — так называемый температурный градиент. При этом теплосеть пред-

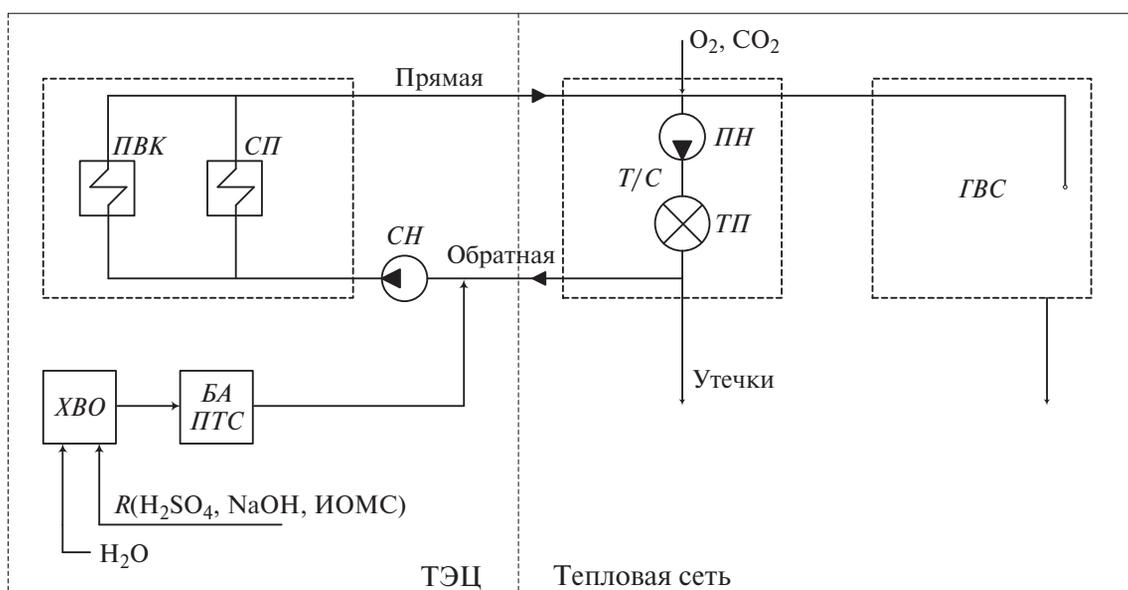


Рис. 1. Структурная схема системы Набережночелнинская ТЭЦ — открытая тепловая сеть г. Набережные Челны:

ХВО — установка химводоочистки; БА ПТС — аккумуляторный бак подпитки теплосети; СП — сетевые подогреватели; ПВК — пиковый водогрейный котел; СН — сетевые насосы; ГВС — горячее водоснабжение; ПН — повышающий насос; R — реагенты; ТП — тепловой потребитель; Т/С — тепловая сеть

ставляет собой протяженную трубную систему с разветвлениями (внутренние байпасы) у абонентов — потребителей теплоты. Возможно наличие участков с относительно медленным течением сетевой воды и “застойных” зон. Не исключено наличие зон циркуляции. По этим причинам не все элементы потока сетевой воды находятся в зоне реакции одинаковое время.

Из всего вышеуказанного следует, что реальная система ТЭЦ — открытая теплосеть с непосредственным водоразбором на нужды ГВС занимает промежуточное положение между реакторами идеального вытеснения и идеального смешения. Для описания таких систем используют диффузионные и ячеечные модели. Поскольку в системе продольные размеры значительно превышают поперечные, предпочтительно применение диффузионной модели [1].

Будем рассматривать теплосеть в стационарном режиме работы. В этом случае в трубной системе теплосети накопление вещества отсутствует. Полагаем, что скорости всех химических реакций и физико-химических процессов (w_j) пропорциональны концентрациям веществ в первой степени — реакции первого порядка. Это наиболее универсальная закономерность, поскольку большая часть процессов имеет первый порядок по веществу либо может быть сведена к первому порядку ($w_j = kc_j$, где k — константа скорости, c_j — концентрация j -го вещества).

В первом приближении можно считать, что в радиальном направлении распределение концентрации равномерное и диффузия происходит только вдоль оси трубы z . Это может быть верным, поскольку наряду с молекулярной диффузией в реакторе вытеснения происходит турбулентная диффузия, связанная с хаотичной пульсацией скорости, что приводит к выравниванию условий (концентраций, температуры) в радиальном направлении и, наоборот, к проявлению продольной диффузии. Кроме того, имеет место замедление движения потока в пристеночной области (тейлоровская диффузия), которое также приводит к размыванию “поршня”. Поскольку экспериментально разделить различные виды диффузии затруднительно, целесообразно все их объединить с помощью коэффициента продольной диффузии (или коэффициента продольного перемешивания, или коэффициента обратного перемешивания)

$$D_L = D_{\text{мол}} + D_{\text{турб}} + D_{\text{тейл}}$$

При сделанных предположениях для описания процессов в теплосети возможно использование однопараметрической диффузионной модели. Поскольку остается только одна переменная z , уравнение диффузионной модели можно записать с использованием обычных, а не частных производных. При условии постоянства коэффициента продольной диффузии D_L и линейной скорости потока u_z получаем:

$$-u_z \frac{dc_j}{dz} + D_L \frac{d^2c_j}{dz^2} - kc_j = 0. \quad (1)$$

Для решения уравнения (1) переходим к безразмерным величинам:

$$Z = \frac{z}{L} = \frac{\tau}{\bar{\tau}}; \quad C(Z) = \frac{c_{j,0}}{c_{j,z}}$$

где Z и C — текущая координата трубной системы (реактора) и концентрация в безразмерном виде; $\bar{\tau} = V/v_0 = L/u_0$ — среднее или условное время пребывания элементарного объема в реакторе; V и L — объем и длина трубной системы; v_0 и u_0 — объемная и линейная скорости потока на входе в систему.

Для учета относительной эффективности двух разнонаправленных физических процессов — конвективного переноса и продольного диффузионного перемешивания — используем безразмерный диффузионный критерий Пекле

$$Pe = \frac{u_0 L}{D_L} = \frac{v_0 L}{\bar{S} D_L},$$

где \bar{S} — средняя площадь сечения трубной системы.

Крайние значения числа Pe соответствуют идеальным случаям: при $Pe \rightarrow 0$ реактор вырождается в аппарат идеального смешения, при $Pe \rightarrow \infty$ — в аппарат идеального вытеснения.

С использованием безразмерных переменных и числа Pe уравнение (1) можно представить в следующем виде:

$$\frac{1}{Pe} \frac{d^2C}{dZ^2} - \frac{dC}{dZ} - k\bar{\tau}C = 0. \quad (2)$$

Получено линейное однородное дифференциальное уравнение второго порядка с постоянными коэффициентами. При этом число Pe является единственным параметром с крайними значениями $0, \infty$ и промежуточной областью допустимых значений при

$0 < \text{Pe} < \infty$. Уравнение (2) решается аналитически [2]. Его общее решение:

$$C(Z) = \mu_1 \exp(\lambda_1 Z) + \mu_2 \exp(\lambda_2 Z), \quad (3)$$

где μ_1, μ_2 — произвольные константы; $\lambda_{1,2} = \frac{\text{Pe}}{2} \left(1 \pm \sqrt{1 + 4 \frac{k\bar{\tau}}{\text{Pe}}} \right)$ — корни характеристического уравнения $\frac{1}{\text{Pe}} \lambda^2 - \lambda - k\bar{\tau} = 0$.

Для нахождения констант μ_1, μ_2 из выражения (3) необходимо установить граничные условия. Чаще всего при решении дифференциального уравнения второго порядка диффузионной модели используют граничные условия Данквертса [3, 4], которые мы посчитали некорректными, так как постулируемая нулевая скорость на конечном участке реактора противоречит физическому смыслу, поскольку по реакции первого порядка снижение концентрации вещества происходит по экспоненте и нулевая скорость достижима только на бесконечности. Кроме того, двухэкспонентное решение дает экстремум за пределом участка $Z > 1$.

Исходя из физической сути процессов, очевидно, следует установить другие граничные условия.

На кривой зависимости $C(Z) - Z$ имеют три граничные точки: 1 — до входа в реактор, 2 — после входа в реактор, 3 — на выходе из реактора. Первое граничное условие

$$C_{0-0} = C_0 = 1 \quad (4)$$

означает, что до входа в реактор (теплосеть) в точке $Z=0-0$ концентрация вещества равна исходной (концентрация в подпиточной воде).

Второе граничное условие предполагает наличие скачка концентрации на входе в реактор, как это наблюдается для крайнего случая ($\text{Pe} = 0$), соответствующего режиму идеального смешения. Скачок концентрации на входе в реактор (соответствует входу подпиточной воды в теплосеть) определяется влиянием встречного диффузионного потока. При этом предполагается идеальное смешение входящего и встречного диффузионного потоков в точке $Z = 0 + 0$. Очевидно, что значение концентрации после входа в реактор C_{0+0} в точке $Z = 0 + 0$ должно лежать в области, ограниченной крайними случаями — $\text{Pe} = 0$ или ∞ :

$$C_\infty(\text{Pe} = 0) \leq C_{0+0}(\text{Pe}) \leq C_0. \quad (5)$$

Третье граничное условие отражает стабилизацию процесса на бесконечности:

$$C(\infty) = \lim_{Z \rightarrow \infty} C_\infty(\text{Pe}). \quad (6)$$

Условие (6) вытекает из особенностей протекающих физических процессов. Для реакции первого порядка зависимость концентрации от времени представлена экспонентой, стремящейся к нулю. При этом встречный диффузионный поток приводит к выравниванию концентрации, а не к ее уменьшению в пределе. Поэтому для любых значений $\text{Pe} \neq 0$ величина $C(Z) \rightarrow 0$ при $Z \rightarrow \infty$. При $\text{Pe} = 0$ (режим идеального смешения) величина $C(\infty) = \text{const}$, но необязательно равна нулю. Этим условиям достаточно для однозначного решения. Рассмотрим крайние случаи по структуре потока.

При $\text{Pe} = 0$ основное уравнение (2), представленное в виде

$$\frac{d^2 C}{dZ^2} - \text{Pe} \frac{dC}{dZ} - \text{Pe} k\bar{\tau} C = 0,$$

превращается в уравнение $d^2 C/dZ^2 = 0$, общее решение которого: $C(Z) = \mu_1 + \mu_2 Z$.

Точное решение вытекает из основных признаков режима идеального смешения, а именно: I — в любой точке ректора устанавливаются абсолютно одинаковые условия, в том числе концентрация; II — на входе в реактор происходит скачкообразное изменение концентрации; III — концентрация на выходе аппарата идеального смешения равна концентрации внутри аппарата; IV — снижение концентрации вещества в объеме ректора обусловлено только протеканием химической реакции. Следовательно, (I): $C_{0-0} = C_0 = 1$, (II): $C_{0+0} = C_{1-0} = \text{const}$, (III): $C_{0-0} - C_{0+0} = k\bar{\tau} C_{0+0}$. Отсюда решение в граничных условиях (4) — (6) дает $\mu_2 = 0$ и $C(Z) = \mu_1$ или:

$$C(Z) = \frac{C_0}{1 + k\bar{\tau}} (\text{Pe} = 0). \quad (7)$$

Уравнение (7) в размерных величинах:

$$c_z = \frac{v_0 c_0}{kV + v_0},$$

что совпадает с известным выражением для реактора идеального смешения.

При $\text{Pe} = \infty$ (режим идеального вытеснения) основное уравнение (2) вырождается до дифференциального уравнения первого порядка

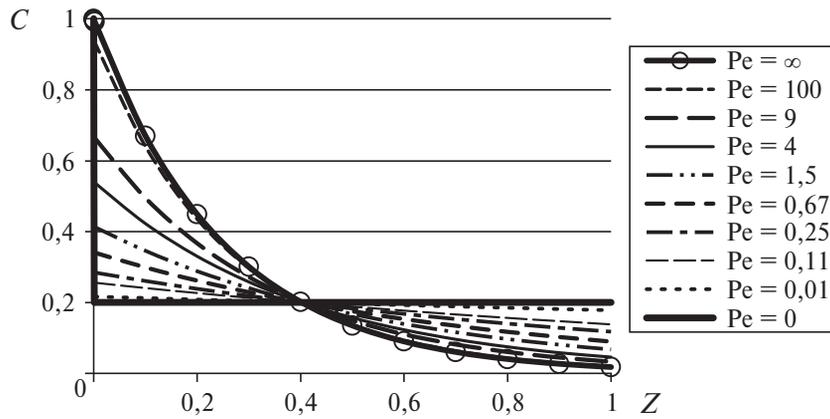


Рис. 2. График распределения концентраций в проточном реакторе в зависимости от числа Pe при $k = 2 \cdot 10^{-4}$, $\bar{\tau} = 1 \cdot 10^4$

$$\frac{dC}{dZ} + k\bar{\tau}C = 0,$$

для которого граничное условие $C(0) = C_0$.

После разделения переменных и интегрирования в пределах

$$\int_{C_0}^{C(Z)} \frac{dC}{C} = - \int_0^Z k\bar{\tau} dZ \quad (Pe = \infty) \quad (8)$$

получаем известное выражение для реакции первого порядка:

$$C(Z) = C_0 \exp(-k\bar{\tau}Z).$$

Для уравнения (2) при всех промежуточных значениях $0 < Pe < \infty$, принимая граничные условия (4) – (6), получаем $\mu_1 = 0$, т. е. в общем решении уравнения (3) растущая экспонента отсутствует. Это вытекает из третьего граничного условия. Тогда решение исходного дифференциального уравнения (3) будет следующим:

$$C(Z) = \mu_2 \exp(\lambda_2 Z). \quad (9)$$

Из условия $Z = 0 + 0$ получаем $\mu_2 = C_{0+0}$.

Полагая, что все решения лежат в области, ограниченной крайними случаями для $Pe = 0$ и $Pe = \infty$, получаем дополнительное уравнение координаты точки пересечения кривых Z_+ :

$$\frac{C_0}{k\bar{\tau} + 1} = C_0 \exp(-k\bar{\tau}Z_+); \quad (10)$$

$$Z_+ = \frac{\ln\left(\frac{1}{1+k\bar{\tau}}\right)}{k\bar{\tau}}. \quad (11)$$

Используя значение точки Z_+ и второе граничное условие (5), получаем условие пересечения кривых в области $0 < Pe < \infty$:

$$\mu_2 \exp(\lambda_2 Z_+) = \frac{C_0}{1+k\bar{\tau}}. \quad (12)$$

Отсюда значение концентрации в точке $Z = 0 + 0$ при разных Pe :

$$\mu_2 = C_{0+0} = \frac{C_0}{\exp(\lambda_2 Z_+) (1+k\bar{\tau})}, \quad (13)$$

$$\text{где } \lambda_2 = \frac{Pe}{2} \left(1 - \sqrt{1 + 4kPe\bar{\tau}} \right).$$

Таким образом, решением исходного дифференциального уравнения (2) является выражение (9), где $\mu_2 = C_{0+0}$ находим по уравнению (13), а Z_+ — по уравнению (11).

На рис. 2 приведен график распределения концентраций в безразмерных координатах в зависимости от Pe , рассчитанный по уравнениям (9) – (13), из которого видно, что для промежуточных случаев ($0 < Pe < \infty$) значения концентрации находятся внутри области, ограниченной крайними случаями, концентрационные кривые выходят из точки $C(0) = 1$ и в пределе стремятся к 0 или к C_∞ .

Реальная система ТЭС — теплосеть включает в себя возврат части сетевой воды (см. рис. 1). Представим систему ТЭС — открытая теплосеть в виде аппарата идеального вытеснения с рециклом (рис. 3). Внутренний объем системы — V , длина трубной системы — L , средняя площадь сечения — \bar{S} , время пребывания — $\bar{\tau}$. В системе протекают химические реакции и физико-химические процессы первого порядка с константой k .

После аппарата вытеснения поток разветвляется, и одна его часть образует обратную связь. Это так называемый полный рецикл,

т. е. составы выходящего и рециркуляционного потоков одинаковы. По классификации теории процессов и аппаратов — это простой цикл (без разделения выходного потока на фракции). Согласно схеме на рис. 3 входящий поток в аппарат вытеснения (прямой поток в тепловую сеть) будет равен сумме подпиточного потока v_0 и рециркулирующего потока v_p (обратная сетевая вода).

Обозначим долю рецикла во входящем потоке (отношение потоков обратной и прямой сетевой воды) через $\alpha = v_p / (v_0 + v_p)$, откуда $v_p = \alpha v_0 / (1 - \alpha)$, а концентрация j -го вещества на входе в аппарат вытеснения (в трубную систему теплосети в точке входа подпиточной воды) $C_{0+0} = (1 - \alpha)C_0 + C_1\alpha$, где C_0 и C_1 — концентрации j -го вещества на входе в теплосеть (в подпиточной воде) и в обратной сетевой воде.

В безразмерных величинах для случая реакции первого порядка в режиме идеального вытеснения ($Pe = \infty$) профиль концентрации по Z будет иметь вид:

$$C(Z) = [(1 - \alpha)C_0 + \alpha C_1] \exp(-k\bar{\tau}Z). \quad (14)$$

В выражении (14) $C_0 = 1$, $\bar{\tau} = \frac{V}{v_0}(1 - \alpha)$, а C_1 находится из условия $Z=1$ по формуле

$$C_1 = \frac{(1 - \alpha)C_0 \exp(-k\bar{\tau})}{1 - \alpha \exp(-k\bar{\tau})}. \quad (15)$$

Выполнен расчет профилей концентраций по полученным уравнениям при различных значениях доли рецикла α . Характер распределения концентрационных кривых почти аналогичен характеру кривых, полученных для однопараметрической диффузионной модели (см. рис. 2). Это сходство отмечалось и ранее [5]. Можно также констатировать, что

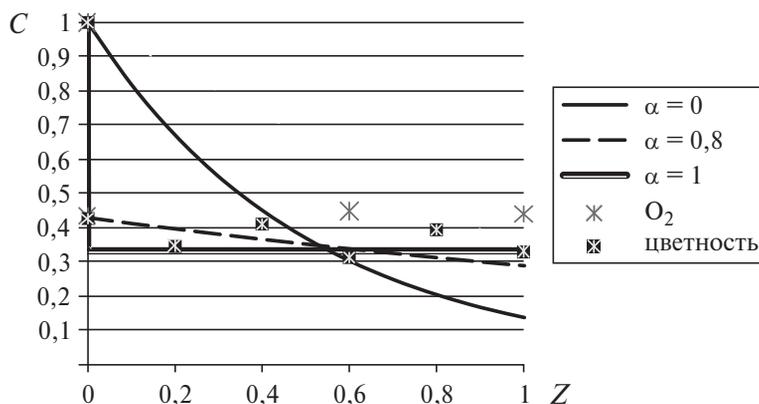


Рис. 4. График распределения концентраций кислорода и цветности в системе ТЭЦ — открытая теплосеть и расчетные концентрационные кривые для $\alpha = 0,8$ и крайних случаев по схеме аппарата вытеснения с рециклом на рис. 3



Рис. 3. Структура потоков для проточного реактора идеального вытеснения с рециклом (модель системы ТЭЦ — открытая теплосеть)

при высоких значениях доли возврата сетевой воды ($\alpha > 0,9$) профиль концентраций в реакторе близок к таковому для идеального случая — режима идеального смешения. Следовательно, сделанное ранее предположение о близости гидродинамического режима в закрытой теплосети к режиму идеального смешения верно [6 – 8].

Общее решение для реактора вытеснения с рециклом с различными значениями числа Pe будет складываться из комбинации уравнений для рецикла и уравнений потока по трубе (реактору) по однопараметрической диффузионной модели. На входе в реактор (теплосеть) при наличии рецикла изменяются начальные условия. Концентрация на входе

$$C'_0 = (1 - \alpha)C_{0-0} + C_1\alpha. \quad (16)$$

Обозначим новые значения среднего времени пребывания элементарного объема в реакторе $\bar{\tau}'$, числа Пекле Pe' и λ'_2 :

$$\bar{\tau}' = \frac{V}{v_0 + v_p} = \frac{L}{u_0 + u_p};$$

$$Pe' = \frac{(u_0 + u_p)L}{D_L} = \frac{(v_0 + v_p)L}{\bar{S}D_L};$$

$$\lambda'_2 = \frac{Pe'}{2} \left(1 - \sqrt{1 + 4 \frac{k\bar{\tau}'}{Pe'}} \right).$$

Тогда получим решение для общего случая:

$$C(Z) = \frac{(1-\alpha)C_{0-0} \exp(\lambda'_2 Z_+) (k\bar{\tau}'+1) \exp(\lambda'_2 Z)}{\exp(\lambda'_2 Z_+) (k\bar{\tau}'+1) - \alpha \exp \lambda'_2}. \quad (17)$$

Были сопоставлены экспериментальные данные о химическом составе подпиточной воды Набережночелнинской ТЭЦ, прямой, обратной сетевой воды и в некоторых точках теплосети г. Набережные Челны с данными расчета по полученной модели. В качестве независимых компонент воды были выбраны цветность и содержание кислорода, поскольку эти два компонента подвергаются непрерывному мониторингу в подпиточной и сетевой воде (данные за октябрь 2010 г.). При этом доля возврата сетевой воды α составляла 0,8 прямой подачи воды. Данные в безразмерных величинах представлены на рис. 4. За $Z=1$ принимаем протяженность трубной системы без учета внутренних байпасов.

Из рис. 4 видно хорошее совпадение концентрационного профиля цветности с теоретической кривой для случая $\alpha = 0,8$. Вместе с тем зависимость концентрации кислорода в сетевой воде напоминает растущую кривую.

Вероятно, это связано с “завоздушиванием” (негерметичностью) теплосети, что подтверждается данными отчетов по обследованию состояния открытой теплосети г. Набережные Челны.

Список литературы

1. **Бесков В. С.** Общая химическая технология. — М.: ИКЦ “Академкнига”, 2006.
2. **Степанов В. В.** Курс дифференциальных уравнений: Учеб. для вузов. 9-е изд., стер. — М.: Едиториал УРСС, 2004.
3. **Кутепов А. М., Бондарева Т. И., Беренгартен М. Г.** Общая химическая технология: Учеб. для техн. вузов. 2-е изд., испр. и доп. — М.: Высшая школа, 1990.
4. **Лаптев А. Г., Фарахов Т. М., Башаров М. М.** Модели тепломассопереноса в насадочных аппаратах. — Тр. Академэнерго, 2012, № 1.
5. **Рамм В. М.** Абсорбция газов. — М.: Химия, 1976.
6. **Математическая** модель процессов в системе ТЭС — закрытая тепловая сеть / А. А. Чичиров, Н. Д. Чичирова, А. И. Ляпин, И. Е. Филиппов. — Изв. РАН. Энергетика, 2008, № 5.
7. **Ляпин А. И., Чичирова Н. Д., Чичиров А. А.** К расчету материального баланса системы ТЭС — закрытая тепловая сеть. — Изв. вузов. Проблемы энергетики, 2007, № 5 — 6.
8. **Однопараметрическая** диффузионная модель системы ТЭЦ — открытая тепловая сеть / Н. Д. Чичирова, А. А. Чичиров, С. М. Власов, И. Е. Филиппов. — Тр. Академэнерго, 2012, № 3.

lyapin81@mail.ru