

**XIII Всероссийская открытая молодежная
научно-практическая конференция
«Диспетчеризация и управление
в электроэнергетике»**

Материалы докладов

Казань, 2018



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ТОРГОВЛИ
РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН
ФГБОУ ВО «КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
АО «СИСТЕМНЫЙ ОПЕРАТОР ЕДИНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ»
ПАО «ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЕТЕВАЯ КОМПАНИЯ ЕДИНОЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ»
РОССИЙСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ КОМИТЕТ МЕЖДУНАРОДНОГО СОВЕТА
ПО БОЛЬШИМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СИСТЕМАМ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ
(РНК СИГРЭ)
БЛАГОТВОРИТЕЛЬНЫЙ ФОНД «НАДЕЖНАЯ СМЕНА»

ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Материалы XIII Всероссийской открытой молодежной
научно-практической конференции

2–4 октября 2018 г.

Казань
2018

УДК 621.31
ББК 31.2
Д48

Рецензенты:

Президент Энергетической Ассоциации «Работа под напряжением» Р.Ф. Ахметов
канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой электрических станций,
сетей и систем ИрННТУ В.В. Федчишин

Редакционная коллегия:

Э.Ю. Абдуллазянов (отв. редактор), Э.В. Шамсутдинов, А.Г. Арзамасова

Д48 **Диспетчеризация и управление в электроэнергетике:** матер.
XIII Всерос. открытой молод. науч.-практ. конф. (Казань 2–4 октября
2018 г.) / редкол. Э.Ю. Абдуллазянов (отв. редактор) и др. – Казань:
Казан гос. энерг. ун-т, 2018. – 238 с.

ISBN 978-5-89873-531-9

Опубликованы материалы XIII Всероссийской открытой молодежной научно-практической конференции по научным направлениям: электрооборудование; РЗА, линии электропередач и подстанции; управление и экономика энергосистем; информационные системы и новые технологии.

Предназначен для научных работников, аспирантов и специалистов, работающих в области энергетики, а также для обучающихся образовательных учреждений энергетического профиля.

Материалы публикуются в авторской редакции. Ответственность за их содержание возлагается на авторов.

УДК 621.31
ББК 31.2

ISBN 978-5-89873-531-9

© Казанский государственный энергетический университет, 2018

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И МИКРОСТРУКТУРЫ АНТРОПОГЕННЫХ ЗОЛЕЙ

Н.И. Москаленко, С.Н. Паржин, И.Р. Додов,
М.С. Хамидуллина, Я.С. Сафиуллина
ФГБОУ ВО «КГЭУ»
Казань, Россия
utisey@gmail.com

Аннотация. Рассматривается измерительный комплекс для спектрометрических исследований атмосферных антропогенных выбросов. Разработанный измерительный комплекс, использованный для исследований оптических характеристик антропогенных золь, имеет полное метрологическое обеспечение. Полученные сведения по спектральным зависимостям эффективных сечений поглощения, рассеяния, ослабления излучения использованы для восстановления микроструктуры антропогенных золь.

Комплекс опробован для измерений ингредиентного состава продуктов сгорания на ТЭЦ в лабораторных огневых испытаниях и при сжигании древесины.

Ключевые слова: функция спектрального пропускания, газовая фаза, дисперсная фаза, микроструктура золь, антропогенные выбросы, концентрация ингредиентов.

MEASURING COMPLEX FOR THE INVESTIGATION OF OPTICAL CHARACTERISTICS AND MICROSTRUCTURE OF ANTHROPOGENIC SOLS

N.I. Moskalenko, S.N. Parzhin, I.R. Dodov, M.S. Khamidullina, Ya.S. Safiullina
Kazan State Power Engineering University
Kazan, Russian Federation
utisey@gmail.com

Abstract. A measuring complex for spectrometric studies of atmospheric anthropogenic emissions is considered. The developed measuring complex, used for studying the optical characteristics of anthropogenic sols, has full metrological support. The obtained data on the spectral dependences of the effective absorption, scattering, and attenuation cross sections were used for reconstruct the microstructure of anthropogenic sols.

The developed measuring complex is tested for measuring the ingredient composition of combustion products at CHP in laboratory fire tests and burning wood.

Key words: spectral transmission function, gas phase, dispersed phase, sol microstructure, anthropogenic emissions, concentration of ingredients.

Введение

Природные и антропогенные выбросы в атмосферу в процессе эксплуатации энергетических установок на предприятиях энергетической отрасли, транспорта, продуктов сгорания растительности уже в настоящее время влияют на радиационный теплообмен в атмосфере, погоду и климат Земли, временные тренды которых проявляются уже в настоящее

время [1–3]. Информация по ингредиентному составу продуктов сгорания энергетических топлив необходима также для расчетов радиационного теплообмена в камерах сгорания энергетических и энерготехнологических установок. Ниже рассмотрен спектральный измерительный комплекс для исследований ингредиентного состава антропогенных выбросов в атмосферу.

Измерительный комплекс для исследований ингредиентного состава антропогенных выбросов в атмосферу

Измерительный комплекс для исследований ингредиентного состава отобранных проб продуктов сгорания базируется на разработке первой в СССР многоходовой газовой кюветы для исследований функций спектрального пропускания (ФСП) ингредиентов газовой фазы атмосферы и продуктов сгорания автомобильных и авиационных двигателей. Спектрометрическая аналитическая лаборатория представляет собой подогревную спектрофотометрический комплекс, использующий в качестве рабочей камеры многоходовую рабочую камеру с внутренним и внешним обогревом. Система обогрева позволяет изменять температуру рабочей среды в диапазоне температур 300–900 К, а вакуумированные монохроматор и осветитель обеспечивают репрезентативность выполнения анализов качественного и количественного состава продуктов сгорания отобранных проб. Необходимость разработки подогревной рабочей камеры возникла вследствие потребности измерения многокомпонентного состава продуктов сгорания, включающих в свой состав летучие и нелетучие в обычных атмосферных условиях компоненты с температурами конденсации в диапазоне от 30 до 150 °С, а также зольную фракцию дисперсной фазы. В обычных атмосферных условиях многие компоненты оказываются захваченными зольными частицами или растворяются в каплях воды. Тем самым результаты измерений широко используемыми технологиями становятся нерепрезентативными и не отражают реального ингредиентного состава продуктов сгорания.

Применение рабочей камеры с многоходовой схемой прохождения излучения позволяет изменять длину оптического пути (чувствительность измерений) в процессе выполнения измерений. В случае необходимости диапазон давлений в рабочей камере может быть расширен за счет разбавления пробы инертным оптически неактивным газом. Высокое спектральное разрешение позволяет идентифицировать компоненты продуктов сгорания по тонкой структуре спектров поглощения. МХК имеет как внутренний, так и внешний обогрев. При использовании

внешнего обогрева внутренняя полость кюветы нагревается до температуры 120-150 °С, а внутренний электрический обогрев позволяет повысить температуру газов до 800 К. Внутренняя печь смонтирована между зеркалами оптической скамьи Уайта МХК в цилиндрическом теплоизоляционном кожухе, изготовленном из асбоцемента, прокаленного при температуре $T = 1000$ К. На торцах печи поставлены отражающие диафрагмы. Температура вдоль оптического пути луча радиации контролируется пятью термопарами с погрешностью ± 3 °С. После установления равновесия перепад температуры на торцах печи по отношению к её центральной части при $T = 300$ °С составляет ~ 20 °С. Конструкция электрической печи и многоходовой кюветы выполнена таким образом, что при давлениях $P < 0,1$ МПа и температуре газовой смеси $T \leq 800$ К температура окон кюветы близка к комнатной, а температура корпуса не превосходит 80 °С. Корпус кюветы представляет собой сборную конструкцию, изготовленную из нержавеющей стали. Все металлические узлы соединяются с помощью герметичных уплотнений, изготовленных из высокотемпературных резиновых пластин.

Степень нагрева регулируется величиной напряжения, подведенного к электропечи от автотрансформатора типа АОМН-40-220. Откачка модулей измерительного комплекса и запуск исследуемой среды осуществляется вакуумно-дозировочной системой, которая соединяется с кюветой с помощью подогревных трубопроводов из нержавеющей стали. Перед введением пробы в МХК пробозаборники подогреваются до температуры $T = 150$ °С. Проба вводится в предварительно нагретую до температуры $T = 150$ °С и вакуумированную рабочую камеру.

Оптическая схема установки представлена на рис. 1. Осветитель I и монохроматор III с приемной камерой IV модернизированного спектрометра ИКС-31 разнесены относительно друг друга. Излучение, модулированное с частотой $f = 12,5$ Гц, проходит через нагреваемую кювету II и зеркалами 10 и 11 фокусируется в плоскости входной щели 23 монохроматора, которая находится в фокусе сферического зеркала 15 (I). Зеркалами 13 и 15 (I) излучение направляется на дифракционную решетку 14. После дифракции пучок параллельных лучей собирается сферическим зеркалом 15 (II) и направляется поворотным зеркалом 16 в приемную камеру IV и далее зеркалом 18 – на приемную площадку приёмника 20 в модуле приёмников излучения V. Для срезания спектров налагающихся порядков дифракционной решетки после выходной щели монохроматора установлен блок сменных отрезающих светофильтров 17. Применялась графическая форма регистрации спектров ослабления

излучения. Спектральная область работы спектрометра ИКС-31 была расширена за счет дополнительной комплектации дифракционными решетками, сменными приёмниками излучения, отрезающими и полосовыми светофильтрами, обеспечивающими его функционирование в спектральном диапазоне 0,25–50 мкм с пределом спектрального разрешения $\Delta\nu = 0,2 \text{ см}^{-1}$.

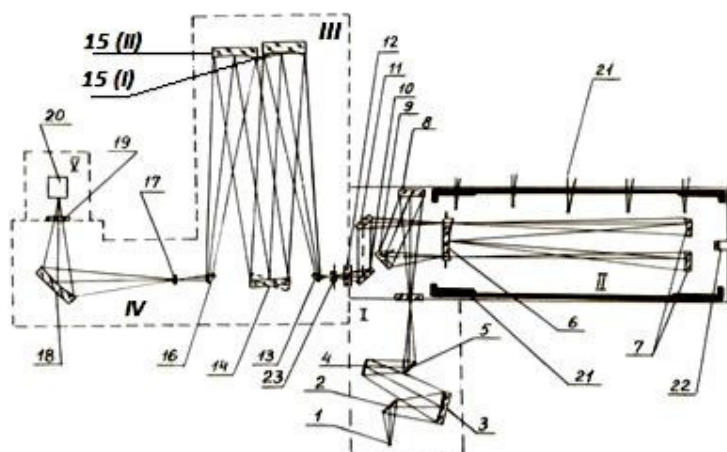


Рис. 1. Оптическая схема спектрометрической установки: 2–5 – зеркала оптической приставки осветителя I с источником излучения 1 (глобара); 8–11 – зеркала оптической приставки для согласования МХК II с осветителем I; 12, 19 – защитные окна модулей камеры спектрометра ИКС-31; 6, 7 – переднее и задние сферические зеркала оптической скамьи Уайта МХК-1; 21 – термопары; 22 – окуляр для наблюдения числа многократного прохождения излучения в МХК

Аналитическая лаборатория была испытана при измерениях состава продуктов сгорания автомобильного топлива, продуктов сгорания соснового бруса в модельных огневых испытаниях в камерах сгорания [5–8], в натуральных огневых испытаниях фрагмента здания системы «ПЛАСТБАУ» [8]. В последнем случае измерения выполнялись в течение всего периода пожара при полном контроле температурного поля в точках отбора проб и в окрестностях огневого эксперимента. Мониторинг ингредиентного состава продуктов сгорания осуществлялся методом тонкоструктурной спектрометрии с момента загорания до конца пожара. На основе данных спектрометрических измерений обнаружены и идентифицированы 34 оптически активных ингредиента, большую часть которых составляют летучие и тяжелые слаболетучие углеводороды.

На рис. 2 иллюстрируется пример записи спектрограммы ослабления излучения продуктами сгорания соснового бруса при горении в свободной атмосфере (кривая 1) в спектральном диапазоне 3,9–5,5 мкм. Для получения спектральной функции ослабления излучения записывается базовая линия (кривая 2) осветителя при вакуумированной МХК и базовая линия

для расчета спектра поглощения излучения газовой фазой отобранной пробы (кривая 3). Спектральная функция ослабления излучения золей $\tau_{vs} = j_{3v} / j_{2v}$, функция спектрального пропускания газовой фазы $\tau_{va} = j_{1v} / j_{3v}$. Ниже остановимся на исследованиях оптических характеристик и микроструктуры дисперсной фазы антропогенных атмосферных выбросов.

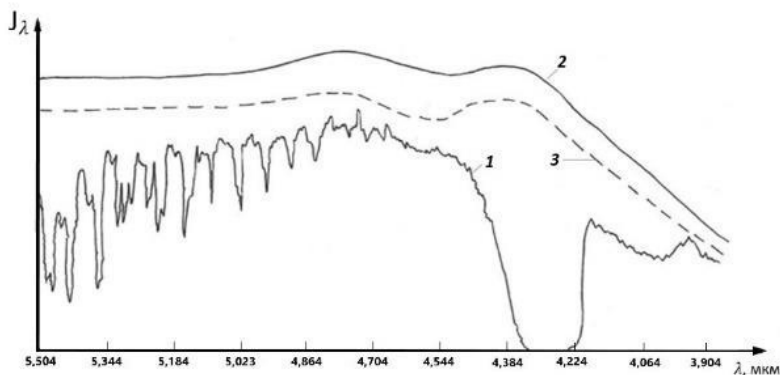


Рис. 2. Спектрограмма ослабления излучения продуктами сгорания соснового бруса при горении в свободной атмосфере: 1 – в спектральном диапазоне 3,9–5,5 мкм; 2 – базовая линия ослабления излучения; 3 – базовая линия поглощения излучения

Исследование оптических характеристик антропогенных золь

Спектральная зависимость коэффициентов ослабления излучения дисперсной фазой продуктов сгорания позволяет разделить ее на фракции, отвечающие механизмам их генерации: золь минеральной составляющей частиц топлива; фракция, вызванная лопанием пленок при дегазации горящих частиц топлива; фракция, генерируемая механизмом ионной нуклеации частиц сажи из газовой фазы продуктов сгорания.

Микроструктура атмосферных выбросов антропогенного сажевого золя зависит от многих факторов: элементного состава топлива, времени пребывания продуктов сгорания в пламённой зоне, электрических свойств продуктов сгорания, которые определяют скорость коагуляции и агломерации первичного сажевого золя. Механизмы образования сажевого золя исследовались на пламённых измерительных комплексах, работающих в режимах спектрометрии и спектрорадиометрии, описанных в [4]. Гомогенная коагуляция частиц золя описывается простым соотношением

$$r / r_0 = \left[1 + \frac{1}{2} k n_0 \cdot \frac{\ln(1 + \alpha t)}{\alpha} \right]^{1/3}, \quad (1)$$

где k – коэффициент броуновской коагуляции, n_0 – число частиц в единице объема, α^{-1} – время, в течение которого радиус частиц увеличивается в два раза.

Для гетерогенной многокомпонентной коагуляции частиц распределение числа частиц $f[r(t)]$ определяется соотношением

$$\frac{f[r(t)]}{f_0(t)} = \sum_i \left[1 + \frac{1}{2} k_i n_{0i} \ln \left\{ \frac{1 + \alpha_i t}{\alpha_i} \right\} \right]^{1/3} + \sum_{i \neq k} \left[1 + \frac{1}{2} k_{ik} (n_{0i} n_{0k})^{1/2} \ln \left\{ \frac{1 + \alpha_{ik} t}{\alpha_{ik}} \right\} \right]^{1/3}, \quad (2)$$

где $f[r(t)]$ – временная зависимость распределения числа частиц по размерам; i – номер фракции; k_i – коэффициент броуновской коагуляции для компонента i ; k_{ik} – коэффициент броуновского взаимодействия частиц разных фракций i, k .

При выполнении расчетов $f[r(t)]$ возможно применение итерационной процедуры в расчетах по времени с шагом Δt . Эксперименты показывают, что на коагуляцию частиц золя сильное влияние оказывают электрические свойства частиц.

При горении газового топлива наблюдается более тонкодисперсный золь с модальным радиусом $r_m = 0,003$ мкм при сжигании метана. С увеличением отношения С/Н молекул углеводорода модальный радиус r_m частиц сажи возрастает.

Оптимизация решения задачи восстановления микроструктуры золя из спектров ослабления излучения проводится из условия:

$$\sum_i \frac{|\Delta \sigma_{a\lambda i}|}{\sigma_{a\lambda i}} = \min, \quad (3)$$

где $\Delta \sigma_{a\lambda i}$ – отклонение в спектральной зависимости коэффициента ослабления восстановленного спектра $\sigma_{a\lambda i}$ от измеренного; i – номер канала измерений.

Процедура определения микроструктуры сажевого золя производится в следующем порядке. Задается микроструктура базы данных нулевых приближений и гамма-распределения для значений $\tau_0 = \tau(\lambda = 0,55 \text{ мкм}) = 1$. Выбирается нулевое приближение и определяются эффективные сечения ослабления излучения для выбранных каналов

(длин волн). Вычисляются величины $\sum_i \frac{|\Delta \sigma_{a\lambda i}|}{\sigma_{a\lambda i}}$ в зависимости от оптической

толщины τ_i выбранной микроструктуры $N_1(r)$ [8] и определяется значение

τ_{\min} , для которого $\sum_i \frac{|\Delta \sigma_{a\lambda i}|}{\sigma_{a\lambda i}} = \min$. Далее вычисляется микроструктура

$N(r)$ по соотношению:

$$N(r) = N_0(r)(1 - \tau_{\min}) + N_1(r)\tau_{\min}. \quad (4)$$

Полученному значению $N(r)$ присваивается нулевое приближение и процедура повторяется для следующей выборки микроструктуры. Процедура определения $N(r)$ завершается после полного перебора микроструктур гамма-распределений [8]. Погрешность вычислений оптической плотности $\frac{\Delta\tau_i}{\tau_i}$ по восстановленным микроструктурам составляет 3–4 %.

На рис. 3 приведены функции распределения числа частиц по размерам для метан-воздушного, пропан-воздушного, ацетилен-воздушного пламён, в выбросах продуктов сгорания бензинового двигателя и продуктах сгорания соснового бруса. Нормировка $f(r)$ выполнена по соотношению $\int f(r)dr = 1$.

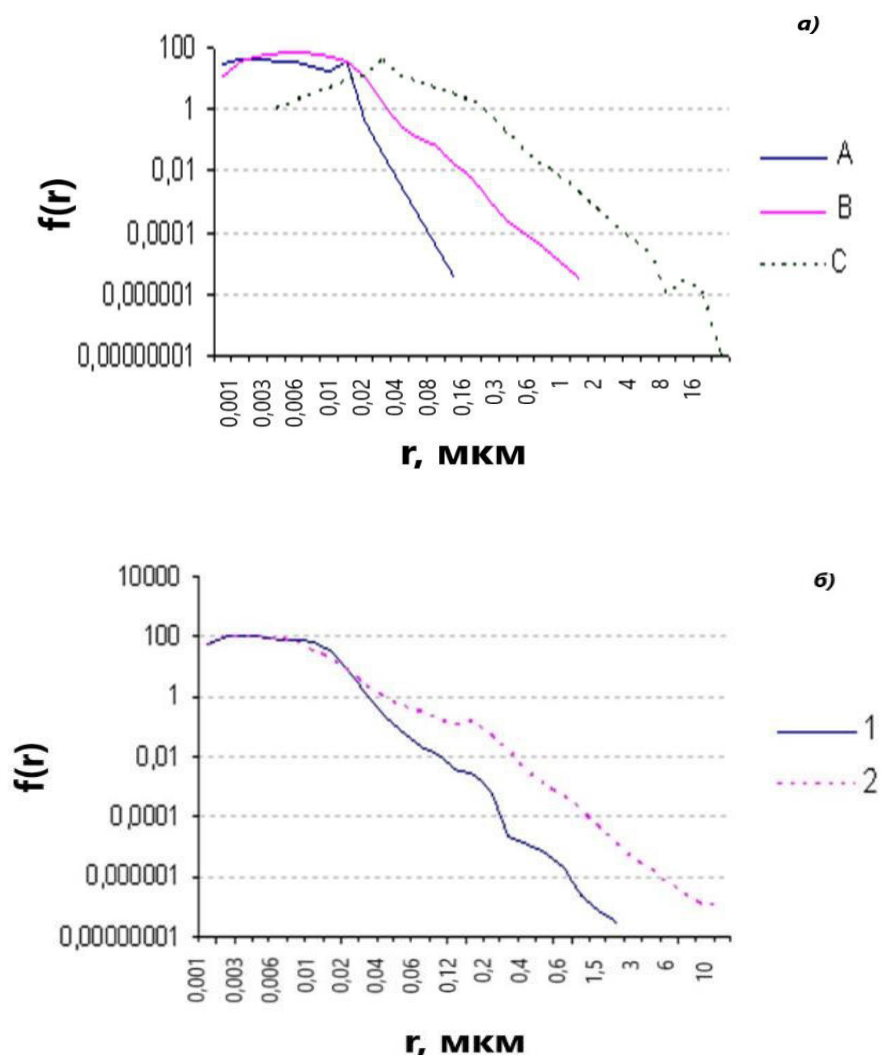


Рис. 3. Функция распределения $f(r)$ числа частиц по размерам: r – радиус частиц. Пламёна: A – метан-воздушное; B – пропан-бутан-воздушное; C – ацетилен-воздушное; 1 – в выбросах продуктов сгорания бензинового двигателя; 2 – в продуктах сгорания соснового бруса

Кроме сажевого золя, были выполнены экспериментальные исследования коэффициентов ослабления излучения асбестового золя, который образуется в результате разложения асбоцементных строительных материалов при температурах $T > 500$ °С. Результаты представлены на рис. 4, из которого следует, что образующийся асбестовый золь в результате прокаливания асбоцементных плит является тонкодисперсным и сильно гигроскопичным, а его оптическая плотность возрастает с увеличением относительной влажности.

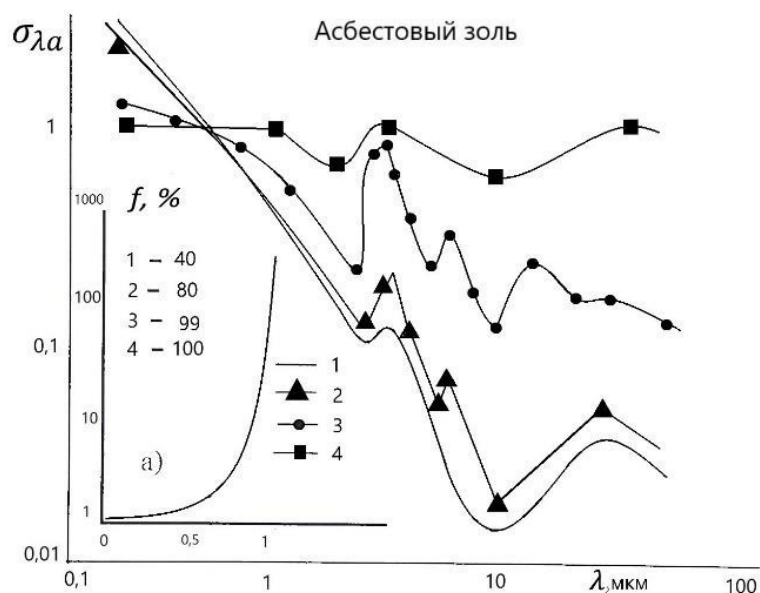


Рис. 4. Нормированный спектральный коэффициент ослабления σ_{λ_a} асбестового золя для различных значений относительной влажности f воздуха, где a – кривая роста оптической плотности

Список литературы

1. Кондратьев К.Я., Москаленко Н.И. Парниковый эффект атмосферы и климат. М.: ВИНТИ, 1984. 264 с.
2. Москаленко Н.И., Сафиуллина Я.С., Хамидуллина М.С. Моделирование антропогенных воздействий на климат // Техника и технологии в XXI веке: современное состояние и перспективы развития. Новосибирск: ЦРНС. 2009. Кн. 4. С. 155–158.
3. Москаленко Н.И., Сафиуллина Я.С., Садыкова М.С. Зональное моделирование парникового эффекта атмосферы и антропогенных изменений климата // Альтернативная энергетика и экология. 2014. № 2. С. 43–54.
4. Равновесные и неравновесные процессы излучения: высокотемпературные среды, радиационный теплообмен / Н.И. Москаленко [и др.]. Казань: Изд-во КГЭУ, 2014. 260 с.

5. Determination ingredient composition of turbojet engine combustion gases by the fine structure spectroscopy / N.I. Moskalenko [et al.] // Russian Aeronautics. 2016. Vol. 59, № 3. P. 116–121.

6. Москаленко Н.И., Сафиуллина Я.С., Загидуллин Р.А. Микроструктура и радиационные характеристики сажевого золя в пламёнах и антропогенных выбросах продуктов сгорания // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2013. № 5–6. С. 23–32.

7. Москаленко Н.И., Сафиуллина Я.С., Хамидуллина М.С. Моделирование радиационного теплообмена в средах, возмущенных сильными антропогенными и природными воздействиями. Возможные климатические последствия постядерных конфликтов // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2014. № 9–10. С. 21–30.

8. Москаленко Н.И., Сафиуллина Я.С. Применение метода тонкоструктурной спектроскопии для определения ингредиентного состава продуктов сгорания топлив // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2009. № 11–12. С. 22–32.

УДК 621.311.11

РЕКОНСТРУКЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ НОВОСИБИРСКОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Ю.М. Сидоркин¹, Е.С. Нестеренко²

¹ФГБОУ ВО «НГТУ»

²АО «РЭС»

Новосибирск, Россия

elena.repina2011@yandex.ru

Аннотация. В работе предложено несколько вариантов усиления электрической сети Новосибирской энергосистемы, повышения пропускной способности электрической сети при выдаче мощности с этой ТЭЦ и обеспечения надежности электроснабжения ответственных потребителей. Рассмотрен вариант строительства кабельной линии 110 кВ с управляемым токоограничивающим реактором.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, установившийся режим электрической сети, автоматика ограничения перегрузки оборудования.

RECONSTRUCTION OF NOVOSIBIRSK POWER SYSTEM ELECTRIC NETWORK

Y.M. Sidorkin¹, E.S. Nesterenko²

¹Novosibirsk State Technical University

²Distribution company «Regional electric networks»

Novosibirsk, Russian Federation

elena.repina2011@yandex.ru