

Влияние промышленных выбросов предприятий теплоэнергетики на поглощение солнечного излучения в атмосфере

© 2023. В. А. Кузьмин, д. т. н., профессор, г. н. с.,
И. А. Заграй, к. т. н., с. н. с.,
Н. А. Шмакова, ст. преподаватель,
Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
e-mail: ZagrayIA@yandex.ru

В работе проведена оценка влияния выбросов предприятий теплоэнергетики на поглощение излучения в атмосфере через расчёт коэффициентов поглощения и функций поглощения продуктов сгорания при факельном сжигании твёрдых топлив (угля и торфа) в топке парового котла БКЗ-210-140Ф. На основании химического состава газовой фазы и частиц конденсированной фазы выполнены расчёты коэффициентов поглощения при температуре 300 К в спектральном интервале 0,4–14 мкм, а также функций поглощения при толщинах слоя 5 и 10 м. Наличие частиц золы вносит существенный вклад в поглощение солнечного излучения продуктами сгорания в окнах прозрачности газовой фазы. При отсутствии системы очистки дымовых газов для оптического диапазона (0,4–0,78 мкм) поглощение может составлять до 20% при сжигании угля и до 46% при сжигании торфа. В широком окне прозрачности атмосферы 7,5–14 мкм функция поглощения продуктов сгорания принимает значения от 73 до 100% при сжигании угля и от 64 до 100% при сжигании торфа. Наибольшая оптическая толщина по коэффициентам поглощения газовой фазы приходится на компоненты H_2O и CO_2 , которые вносят основной вклад в создание парникового эффекта.

Ключевые слова: атмосфера, парниковый эффект, факельное сжигание угля и торфа, продукты сгорания, газовая фаза, частицы золы, коэффициент поглощения, функция поглощения.

Influence of industrial emissions from heat power engineering enterprises on the absorption of solar radiation in the atmosphere

© 2023. V. A. Kuzmin ORCID: 0000-0001-9979-4610
I. A. Zagrai ORCID: 0000-0002-8886-8677
N. A. Shmakova ORCID: 0000-0002-7718-7681
Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
e-mail: ZagrayIA@yandex.ru

The paper evaluates the effect of emissions from heat power engineering enterprises on the absorption of radiation in the atmosphere through the calculation of absorption coefficients and absorption functions of combustion products during flaring of solid fuels (coal and peat) in the furnace of BKZ-210-140F steam boiler. The chemical composition of the gas phase and condensed phase particles were used to calculate the absorption coefficients at a temperature of 300 K and the spectral range of 0.4–14 μm , as well as the absorption functions at layer thicknesses of 5 and 10 m. The presence of ash particles makes a significant contribution to the absorption of solar radiation by combustion products in the transparency windows of the gas phase. In the absence of a flue gas purification system for the optical range (0.4–0.78 μm), absorption can be up to 20% during flaring of coal and up to 46% during flaring of peat. For the atmospheric transparency window of 7.5–14 μm , the absorption function of combustion products takes values from 73 to 100% during flaring of coal and from 64 to 100% during flaring of peat. The largest optical thickness in terms of the absorption coefficients of gas phase is accounted for the components H_2O and CO_2 , which make the main contribution to the creation of the greenhouse effect.

Keywords: atmosphere, greenhouse effect, flaring of coal and peat, combustion products, gas phase, ash particles, absorption coefficient, absorption function.

Антропогенное воздействие на окружающую среду за последнее время стало настолько существенным, что даже в пределах одного поколения наблюдаются ощутимые изменения атмосферных и климатических условий. В докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата [1] утверждается, что с вероятностью 95% деятельность человека является основной причиной происходящего глобального потепления. Присутствие в атмосфере газов и аэрозолей (твёрдых и жидких частиц), создающих парниковый эффект, вызывает поглощение в атмосфере Земли теплового излучения, испускаемого суши и океаном, в результате чего количество уходящего в космос излучения оказывается меньшим, чем оно было бы в отсутствие поглотителей в атмосфере. Согласно работам [2, 3] чёрный углерод является основным поглотителем солнечного излучения в видимом диапазоне и представляет собой второй по значению фактор после CO_2 , оказывающий влияние на глобальное потепление.

По проведённым оценкам, на территории России потепление климата идёт со скоростью $0,51^\circ\text{C}$ за десятилетие, что более чем в 2,5 раза превышает среднюю скорость глобального потепления [4, 5]. В структуре выбросов парниковых газов в Российской Федерации доминирует энергетический сектор, доля которого в совокупном выбросе в 2019 г. составляла 78,7%. При этом количество выбросов парниковых газов в эквиваленте CO_2 составило 1,67 млрд т, из которых на долю CO_2 приходилось 89,3%, CH_4 – 10,3%, N_2O – 0,3% [4]. Изменение потребления ископаемых видов топлива (угля, торфа, нефти, природного газа) и продуктов их переработки в зависимости от сезона, тенденций развития экономики и других факторов оказывает влияние на величину промышленных выбросов предприятий теплоэнергетики.

Борьба с усилением парникового эффекта планируется всеми способами: снижение выбросов в атмосферу путём установления квот по выбросам и утилизация CO_2 карбоновыми фермами [6, 7]. Один гектар такой фермы способен поглощать от 30 до 60 т CO_2 за год. Одним из средств борьбы с выбросами CO_2 является учёт углеродного (карбонового) следа производимой продукции, т. е. расчёт количества выбросов CO_2 и других парниковых газов на единицу продукции [8]. На очередной конференции ООН по изменению климата (КС-26), проходившей в 2021 г. в г. Глазго, было отмечено, что сжигание углеродного топлива является

главной причиной накопления парниковых газов в атмосфере, а рост средней температуры на планете к 2100 г. может достигнуть $2,4$ – $2,7^\circ\text{C}$, что значительно превышает установленный безопасный предел в $1,5^\circ\text{C}$ [9].

Основные экономики мира, включая Россию, уже наметили план на пути к экологизации производства путём перехода на низкоуглеродные и энергосберегающие технологии в самых разных отраслях экономики. В рамках конференции КС-26 многие страны (Вьетнам, Польша, Чили и др.) приняли обязательство отказаться от ископаемого топлива. Однако страны, экономика которых напрямую зависит от использования угля, такие как Китай, США, Австралия, Индия и Россия, отказались от принятия подобных обязательств.

В России в целях реализации Указа Президента от 8 февраля 2021 г. № 76 «О мерах по реализации государственной научно-технической политики в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений» разработана Программа в области экологического развития и климатических изменений до 2030 г. Программа включает в себя три направления: 1) мониторинг и прогнозирование состояния окружающей среды и климата; 2) смягчение антропогенного воздействия на окружающую среду и климат; 3) адаптация природных систем, населения и отраслей экономики к изменениям климата.

Реализация Программы подразумевает получение и использование достоверных данных об окружающей среде и климатических изменениях, а также разработку комплекса технологических решений в направлении снижения выбросов загрязняющих веществ и парниковых газов и увеличения потенциала поглощения углерода экосистемами.

Целью настоящей работы является оценка влияния выбросов предприятий теплоэнергетики на поглощение солнечного излучения в атмосфере через расчёт коэффициентов поглощения и функций поглощения продуктов сгорания при факельном сжигании твёрдых топлив (угля и торфа) в топке парового котла БКЗ-210-140Ф.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования являются гетерогенные продукты сгорания при факельном сжигании твёрдых топлив (угля и торфа). Моделирование коэффициентов погло-

щения чистой атмосферы и газовой фазы продуктов сгорания выполнено с помощью информационно-вычислительной системы «Спектроскопия атмосферных газов», расчёт коэффициентов поглощения конденсированной фазы продуктов сгорания произведён с применением разработанного на кафедре инженерной физики Вятского государственного университета программного комплекса по определению теплового излучения рабочих сред энергетических установок. Химический состав частиц конденсированной фазы найден методом рентгенофлуоресцентного анализа. Для исследования дисперсности частиц применяли метод электронно-сканирующей микроскопии.

Поглощение солнечного излучения чистой атмосферой. Посредством процессов рассеяния и поглощения атмосфера контролирует количество поступающего на Землю солнечного излучения и количество солнечного излучения, которое возвращается в космос. Благодаря оптическому возбуждению атмосферные газы поглощают солнечное излучение на определённых длинах волн. Озон, кислород и азот поглощают преимущественно в ультрафиолетовом диапазоне, а водяной пар – в ближнем инфракрасном диапазоне.

Водяной пар представляет собой наиболее мощный поглотитель коротковолнового излучения в ближнем ИК-диапазоне. Основные полосы поглощения H_2O находятся вблизи длин волн 1,1; 1,4; 1,9; 2,7; 6,3 мкм. Большая часть поглощения атмосферой происходит благодаря водяному пару, он вносит основной вклад в природный парниковый эффект [4].

Содержание CO_2 в сухом атмосферном воздухе невелико (до 0,045 об. %), но он является вторым по значимости парниковым газом

в атмосфере, поскольку поглощает и переизлучает инфракрасное излучение в различных полосах, центрами которых являются 1,9; 2,7; 4,3; 10,6 и 14 мкм.

В данной работе для расчётов использовали модель атмосферы Института оптики атмосферы СО АН СССР [10] для смеси воздуха в летний сезон на высоте $H = 0$ м и для условий средних широт. Состав атмосферы принимали следующим (в об. %): $H_2O - 1,56$, $CO_2 - 0,0333$, $O_3 - 0,000002$, $N_2O - 0,000028$, $CO - 0,000047$, $CH_4 - 0,000148$, $O_2 - 20,7$, $SO_2 - 0,000008$, $NH_3 - 0,000001$, $N_2 - 77,7$.

С помощью информационно-вычислительной системы «Спектроскопия атмосферных газов» (SPECTRA) (<http://spectra.iao.ru>), содержащей банки данных HITRAN, GEISA, HITEMP для газовых составляющих, произведён расчёт коэффициента поглощения атмосферы при температуре $T = 300$ К, давлении $p = 10^5$ Па в спектральном интервале $\lambda = 0,4 - 14$ мкм (рис. 1а). На рисунке 1б, с представлены функции поглощения атмосферы при толщинах слоя $x = 5$ и 10 м соответственно, которые также использованы для расчёта функций поглощения продуктов сгорания при факельном сжигании твёрдых топлив (угля и торфа).

Функцию поглощения атмосферы определяли по формуле:

$$A = 1 - \exp(-k \cdot x),$$

где k – коэффициент поглощения, 1/м; x – толщина слоя, м.

Данная формула следует из закона Бугера и применима в случае однородной атмосферы и небольшой толщины слоя, в пределах

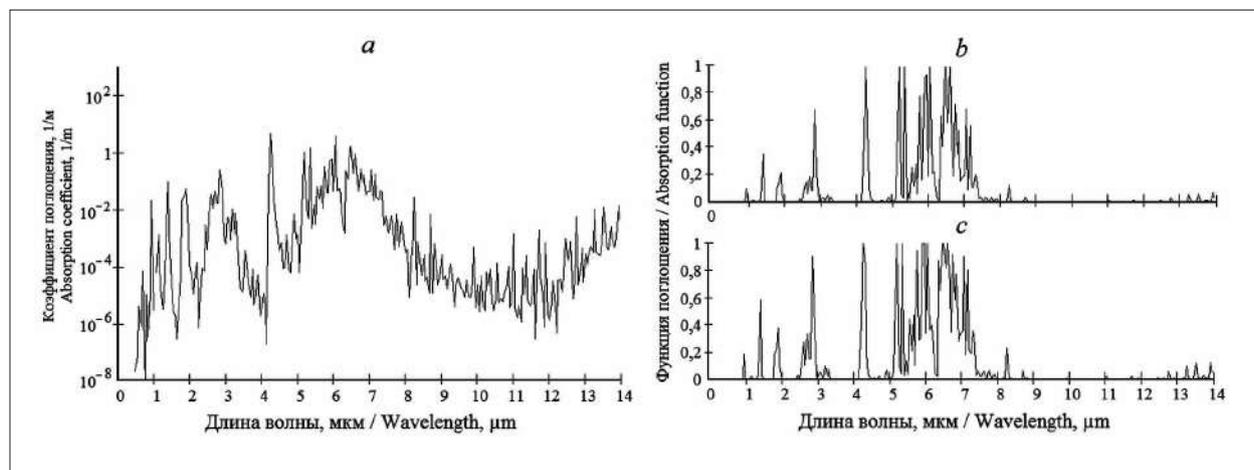


Рис. 1. Коэффициент поглощения (а) и функции поглощения (b, c) атмосферы
 Fig. 1. Absorption coefficient (a) and absorption functions (b, c) of atmosphere

которого давление и температура остаются постоянными. Коэффициент поглощения определяется свойствами вещества (в нашем случае атмосферы) и зависит от температуры, давления и длины волны поглощаемого света. В общем случае, коэффициент поглощения равен сумме коэффициентов поглощения отдельных компонентов атмосферы, таких как молекулы газа и аэрозоли. В данной работе не рассматриваются процессы поглощения на аэрозольных частицах и эффекты рассеяния солнечного излучения.

Согласно рисунку 1, атмосферное поглощение относительно невелико в следующих спектральных интервалах: в видимой области 0,4–0,78 мкм, в инфракрасной области спектра вблизи длин волн 1,1; 1,6; 2,2; 3,8; 4,6 мкм, а также в широком окне прозрачности 7,5–14 мкм [11]. Именно на это окно прозрачности приходится максимум теплового излучения при температурах атмосферы и земной поверхности. Оно способствует оттоку теплового излучения в мировое пространство и, как следствие, уменьшению действия парникового эффекта.

Определение коэффициентов поглощения и функций поглощения продуктов сгорания при сжигании твёрдых топлив. Многие крупные предприятия промышленной теплоэнергетики используют при выработке тепловой и электрической энергии твёрдые топлива различных месторождений, обычно уголь и торф. На Кировских ТЭЦ, помимо угля различных месторождений, используется местный вид топлива – торф. Постоянная смена топлив объясняется их стоимостью, логистическими затратами и близостью местных топливных ресурсов. За счёт местного торфа обеспечивается стабильность работы предприятий топливно-энергетического комплекса, формируется топливная независимость и энер-

гетическая безопасность региона на случай чрезвычайной ситуации. В качестве примера в таблице 1 приводятся характеристики угля Кузбасского бассейна и торфа месторождений Кировской области, используемых на Кировских ТЭЦ.

Постоянная смена видов топлива вынуждает настраивать работу котлоагрегатов на оптимальный режим. Из представленных характеристик угля и торфа следует, что уголь обладает большей зольностью, содержанием углерода и теплотворной способностью по сравнению с торфом. Из-за сравнительно низкой калорийности торф на Кировской ТЭЦ-4 сжигается в смеси с природным газом для обеспечения стабильности работы котла [13]. При факельном сжигании угля и торфа в топках котлов БКЗ-210-140Ф топочные газы представляют собой гетерогенные продукты сгорания, состоящие из газовой фазы (ГФ) и частиц конденсированной фазы (КФ) [13]. В общем случае ГФ состоит в основном из двух- и трёхатомных молекул CO₂, H₂O, NO₂, SO₂, CO, NO, N₂, O₂. Состав продуктов сгорания при сжигании торфа и угля рассчитывался по продуктам полного сгорания по методике [14]. Содержание компонентов ГФ при сжигании угля и торфа приведено в таблице 2. Из таблицы 2 следует, что отличие компонентов ГФ наблюдается только количественное.

Конденсированная фаза при сжигании твёрдых топлив представляет собой частицы золы, состоящие из оксидов различных элементов: SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, K₂O, MgO и т. д. [15]. Количественные показатели образующихся оксидов при сжигании угля и торфа приведены в таблице 3. Из представленных данных следует количественное отличие показателей. В данной работе рассчитывали спектральные коэффициенты поглощения

Таблица 1 / Table 1
Характеристики угля и торфа [12] / Coal and peat characteristics [12]

Наименование показателя / Parameter	Уголь / Coal	Торф / Peat
Содержание влаги W ^r , % / Moisture W ^r , %	12	51,8
Зольность A ^r , % / Ash content A ^r , %	15	6,3
Содержание серы S ^r , % / Sulfur S ^r , %	0,4	0,3
Содержание углерода C ^r , % / Carbon C ^r , %	57,1	24,3
Содержание водорода H ^r , % / Hydrogen H ^r , %	4,1	2,6
Содержание азота N ^r , % / Nitrogen N ^r , %	1,8	1,4
Содержание кислорода O ^r , % / Oxygen O ^r , %	9,6	13,3
Низшая теплота сгорания Q ^r , ккал/кг (кДж/кг)	3673	1933
Low combustion heat Q ^r , kcal/kg (kJ/kg)	(15378)	(8093)
Выход летучих V ^{daf} , % / Volatile matter content V ^{daf} , %	42	50

Таблица 2 / Table 2

Состав (в об. %) газовой фазы продуктов сгорания
Composition of the gas phase (vol. %) in combustion products

Компоненты / Composition	Уголь / Coal	Торф / Peat
CO ₂	14,074	11,55
H ₂ O	9,158	16,192
SO ₂	0,034	0,045
N ₂	73,486	68,578
O ₂	3,249	3,634

Таблица 3 / Table 3

Состав конденсированной фазы (в %) продуктов сгорания [12]
Composition of the condensed phase (%) in combustion products [12]

Компоненты / Composition	Уголь / Coal	Торф / Peat
SiO ₂	59,3	47,59
Al ₂ O ₃	21	18,96
Fe ₂ O ₃	5,7	20,84
CaO	5,3	4,88
K ₂ O	3,8	1,22
MgO	2,2	0,62
P ₂ O ₅	0,8	4,02
TiO ₂	0,9	0,45
Na ₂ O	–	0,38
SO ₃	–	0,55

Примечание: Прочерк означает отсутствие компонента.
Note: A dash means the absence of a component.



Рис. 2. Основные факторы, определяющие коэффициенты поглощения гетерогенных продуктов сгорания
Fig. 2. The main factors determining absorption coefficient of heterogeneous combustion products

компонентов ГФ и КФ для дымовых газов, выбрасываемых в атмосферу при сжигании угля и торфа в паровом котле БКЗ-210-140Ф. В общем случае коэффициенты поглощения ГФ и КФ зависят от разных факторов (рис. 2).

Коэффициенты поглощения ГФ $\alpha_{ГФ}$ при сжигании угля и торфа вычисляли методом полинейного счёта, где в качестве исходных данных использовали состав газовой смеси, температуру, давление и длину волны излучения. Коэффициенты поглощения КФ $\alpha_{КФ}$ определяли через числовую концентрацию и сечения поглощения полидисперсных систем сферических частиц по теории Ми [16].

Коэффициенты поглощения гетерогенных продуктов сгорания при сжигании твёрдых топлив определяли по формуле: $k = \alpha_{ГФ} + \alpha_{КФ}$ при $T = 300 \text{ К}$, $p = 10^5 \text{ Па}$ в спектральном интервале $\lambda = 0,4\text{--}14 \text{ мкм}$.

Функции поглощения A определялись при толщинах слоя $x = 5$ и 10 м , соответствующих концентрациям ГФ и КФ в случае безветренной погоды вблизи дымовой трубы предприятия.

Результаты и обсуждение

На рисунках 3 и 4 представлены значения коэффициента поглощения и функции поглощения продуктов сгорания при сжигании угля и торфа. Наличие частиц КФ вносит существенный вклад в поглощение солнечного излучения продуктами сгорания в окнах прозрачности ГФ.

С помощью технических устройств (фильтры, скрубберы и т. д.) удаётся очистить от большого числа зольных частиц дымовые

газы, выбрасываемые в атмосферу. При наихудшем сценарии (без системы очистки дымовых газов) все продукты сгорания из топки котла попадают в атмосферный воздух, создавая облако загрязняющих веществ. В этом случае для оптического диапазона (0,4–0,78 мкм) поглощение может составлять до 20% при сжигании угля и до 46% при сжигании торфа ($x = 10 \text{ м}$). В широком окне прозрачности атмосферы 7,5–14 мкм функция поглощения принимает значения от 73 до 100% при сжигании угля и от 64 до 100% при сжигании торфа ($x = 10 \text{ м}$).

Оптическая толщина по коэффициентам поглощения $\tau = \alpha_{ГФ} \cdot x$ для разных компонентов ГФ, выбрасываемых в атмосферу, разная. Наибольшая величина наблюдается для компонентов H_2O и CO_2 . Именно этим компонентам соответствует наибольшее поглощение солнечной энергии, которая задерживается в атмосфере и которая является одной из причин парникового эффекта.

Даже при наличии очистительных систем дымовых газов, которые зависят от используемого типа топлива, в атмосферу попадает гораздо большее количество CO_2 (до 14 об. %), чем содержится в чистой атмосфере (0,03–0,045 об. %). В связи с этим усиливается поглощение вблизи основных полос в ближнем и среднем ИК-диапазоне (1,9; 2,7; 4,3; 10,6 и 14 мкм). В качестве примера на рисунке 5 приведены коэффициент поглощения и функции поглощения углекислого газа при концентрации CO_2 (14,074 об. %), соответствующей сжиганию угля в топке котла БКЗ-210-140Ф.

Помимо основных продуктов полного сгорания топлива, представленных в таблице

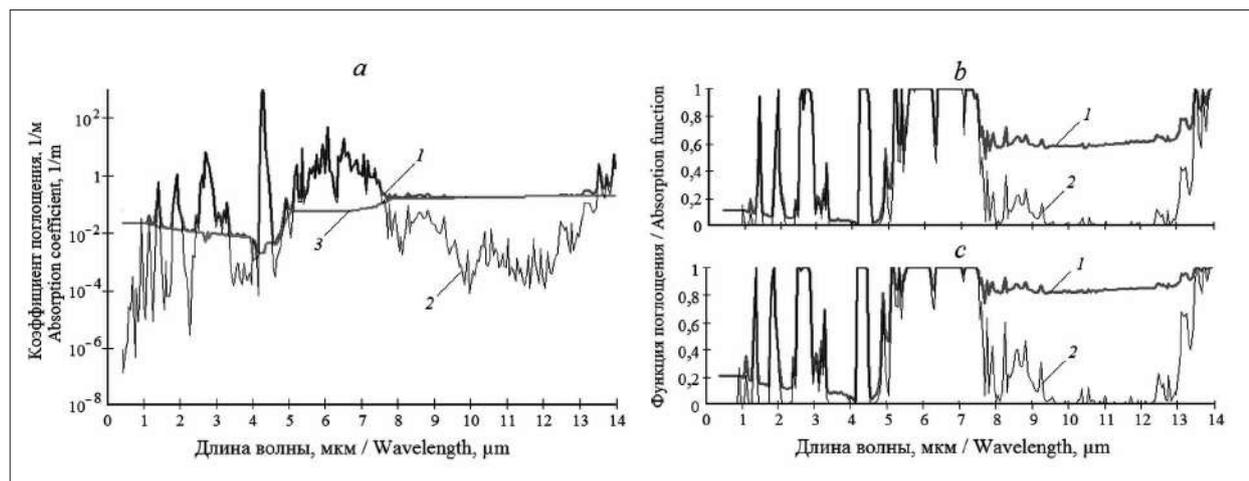


Рис. 3. Коэффициент поглощения (a) и функции поглощения (b, c) продуктов сгорания при сжигании угля: 1 – газ + частицы, 2 – газ, 3 – частицы
 Fig. 3. Absorption coefficient (a) and absorption spectra (b, c) of combustion products from peat combustion: 1 – gas + particles, 2 – gas, 3 – particles

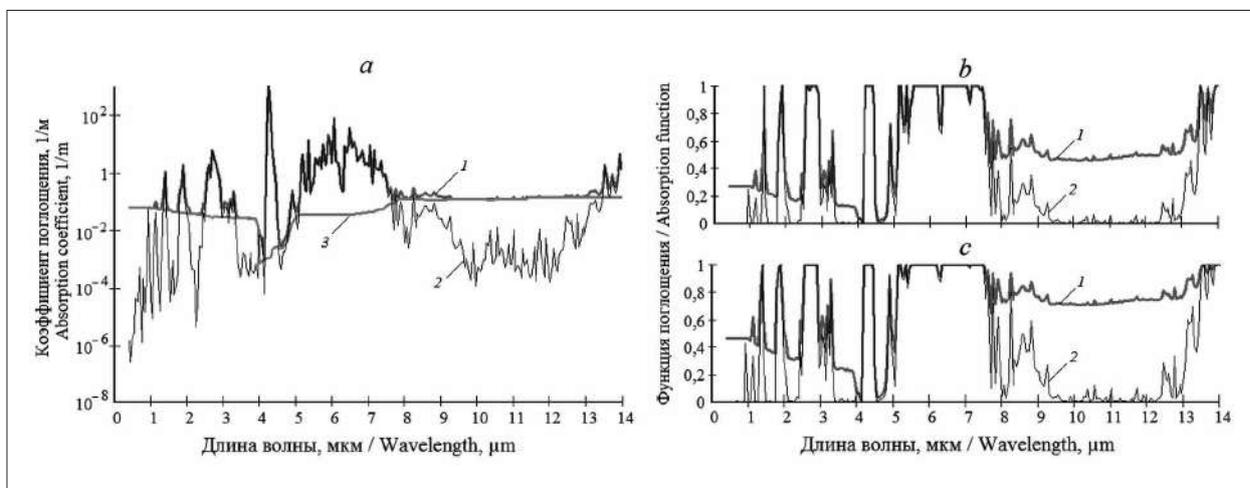


Рис. 4. Коэффициент поглощения (a) и функции поглощения (b, c) продуктов сгорания при сжигании торфа: 1 – газ + частицы, 2 – газ, 3 – частицы
Fig. 4. Absorption coefficient (a) and absorption spectra (b, c) of combustion products from peat combustion: 1 – gas + particles, 2 – gas, 3 – particles

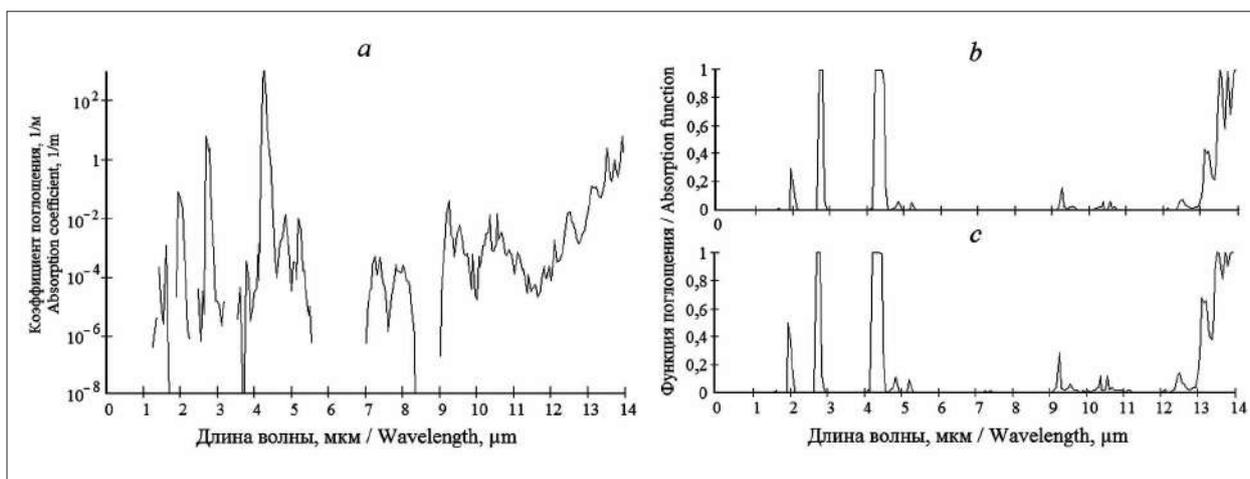


Рис. 5. Коэффициент поглощения (a) и функции поглощения (b, c) углекислого газа
Fig. 5. Absorption coefficient (a) and absorption functions (b, c) of carbon dioxide

2, в атмосферу попадают продукты неполного сгорания: NO_x (NO , NO_2 , N_2O), CO , SO_3 и другие вредные вещества.

Низкий выход NO_x достигается при сжигании топлива с высоким коэффициентом избытка воздуха α , что соответствует снижению температуры пламени, а также уменьшению скорости превращения CO в CO_2 . С повышением температуры продуктов сгорания повышается эффективность работы котла, но ухудшаются его экологические показатели [12].

Выбрасываемые дымовые газы, содержащие ГФ и частицы КФ, поглощают полученную солнечную энергию, меняют температурные и атмосферные условия (парниковый эффект). А компоненты газовой фазы NO_2 , NO , SO_2 , SO_3 в соединении с атмосферной влагой создают «кислотные дожди».

Заключение

В работе произведён расчёт коэффициентов поглощения и функций поглощения чистой атмосферы при температуре $T = 300 \text{ K}$, давлении $p = 10^5 \text{ Па}$ в спектральном интервале $\lambda = 0,4\text{--}14 \text{ мкм}$. Указаны основные полосы поглощения атмосферных газов, создающих природный парниковый эффект, и спектральные интервалы (окна прозрачности), способствующие оттоку теплового излучения от земной поверхности в мировое пространство.

Представленные характеристики Кузнецкого угля и торфа месторождений Кировской области, используемых на кировских ТЭЦ, позволили определить состав продуктов сгорания при сжигании твёрдых топлив в топках котлов БКЗ-210-140Ф. На основании химического состава газовой фазы и частиц

конденсированной фазы проведены расчёты коэффициентов поглощения и функций поглощения продуктов сгорания при сжигании угля и торфа. Функции поглощения определяли при толщинах слоя $x = 5$ и 10 м.

Наличие зольных частиц вносит существенный вклад в поглощение солнечного излучения продуктами сгорания в окнах прозрачности газовой фазы. При отсутствии системы очистки дымовых газов для оптического диапазона ($0,4-0,78$ мкм) поглощение может составлять до 20% при сжигании угля и до 46% при сжигании торфа ($x = 10$ м). В широком окне прозрачности атмосферы $7,5-14$ мкм функция поглощения продуктов сгорания принимает значения от 73 до 100% при сжигании угля и от 64 до 100% при сжигании торфа ($x = 10$ м).

Наибольшая оптическая толщина по коэффициентам поглощения газовой фазы приходится на компоненты H_2O и CO_2 , которые вносят основной вклад в создание парникового эффекта.

Выбрасываемые дымовые газы, содержащие также продукты неполного сгорания топлива (NO_x , CO , SO_2 и др.), поглощают полученную солнечную энергию, меняют температурные и атмосферные условия, а некоторые из них при соединении с атмосферной влагой создают «кислотные дожди».

Литература

1. МГЭИК, 2014: Изменение климата, 2014 г.: Обобщающий доклад. Вклад Рабочих групп I, II и III в Пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата / Под ред. Р.К. Пачаури, Л.А. Мейера. Женева: МГЭИК, 2015. 163 с.

2. Ramanathan V., Carmichael G. Global and regional climate changes due to black carbon // *Nature Geoscience*. 2008. V. 1. No. 4. P. 221–227.

3. Ramanathan V., Crutzen P.J., Kiehl J.T., Rosenfeld D. Aerosols, climate, and the hydrological cycle // *Science*. 2001. V. 294. No. 5549. P. 2119–2124.

4. Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2019 гг. Часть 1. М.: Росгидромет, 2021. 459 с.

5. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. М.: Росгидромет, 2021. 104 с.

6. Нурғалиев Д.К., Селивановская С.Ю., Кожевникова М.В., Галицкая П.Ю. Некоторые вызовы и возможности для России и регионов в плане глобального тренда декарбонизации // *Георесурсы*. 2021. Т. 23. № 3. С. 8–16.

7. Лазарев В.М., Корнеев Д.А. Использование карбоновых ферм для фиксации углекислого газа // *Успехи в химии и химической технологии*. 2021. Т. 35. № 2 (237). С. 7–9.

8. Эксперт – Напали на углеродный след [Электронный ресурс] <https://expert.ru/expert/2020/43/napali-na-uglerodnyj-sled/> (Дата обращения: 01.12.2021).

9. Climate Action Tracker – Glasgow’s 2030 credibility gap: net zero’s lip service to climate action [Электронный ресурс] <https://climateactiontracker.org/publications/glasgows-2030-credibility-gap-net-zeros-lip-service-to-climate-action/> (Дата обращения: 01.12.2021).

10. Зуев В.Е., Комаров В.С. Современные проблемы атмосферной оптики. Том 1. Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы. Ленинград: Гидрометеоздат, 1986. 264 с.

11. Тимофеев Ю.М., Васильев А.В. Теоретические основы атмосферной оптики. СПб.: Наука, 2003. 474 с.

12. Кузьмин В.А., Заграй И.А., Десятков И.А. Контроль образования оксидов азота в топке парового котла с целью защиты атмосферного воздуха от загрязнения // *Теоретическая и прикладная экология*. 2021. № 3. С. 126–132.

13. Кузьмин В.А., Заграй И.А., Маратканова Е.И., Десятков И.А. Исследование теплового излучения топочных газов в паровом котле при сжигании твёрдых топлив // *Теплофизика и аэромеханика*. 2019. Т. 26. № 2. С. 301–315.

14. Тепловой расчёт котельных агрегатов. Нормативный метод / Под ред. Н.В. Кузнецова, В.В. Митора, И.Е. Дубовского, Э.С. Карасиной. М.: Эколит, 2011. 296 с.

15. Кузьмин В.А., Заграй И.А., Десятков И.А. Исследование дисперсности и химического состава частиц в продуктах сгорания при сжигании газоторфяной смеси в паровом котле БКЗ-210-140Ф // *Известия вузов. Проблемы энергетики*. 2016. № 5–6. С. 55–63.

16. Кузьмин В.А., Заграй И.А., Рукавишников Р.В. Комплексное исследование теплового излучения гетерогенных продуктов сгорания при сжигании торфа в энергетических установках // *Тепловые процессы в технике*. 2015. Т. 7. № 10. С. 459–464.

References

1. IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. R.K. Pachauri, L.A. Meyer. Geneva: IPCC, 2015. 163 p. (in Russian).

2. Ramanathan V., Carmichael G. Global and regional climate changes due to black carbon // *Nature Geoscience*. 2008. V. 1. No. 4. P. 221–227. doi: 10.1038/ngeo156

3. Ramanathan V., Crutzen P.J., Kiehl J.T., Rosenfeld D. Aerosols, climate, and the hydrological cycle // *Science*. 2001. V. 294. No. 5549. P. 2119–2124. doi: 10.1126/science.1064034

4. National report on the inventory of anthropogenic emissions from sources and removals by sinks of greenhouse gases not regulated by the Montreal Protocol for 1990–2019. Part 1. Moskva: Rosgidromet, 2021. 459 p. (in Russian).
5. A report on climate features on the territory of the Russian Federation in 2020. Moskva: Rosgidromet, 2021. 104 p. (in Russian).
6. Nurgaliev D.K., Selivanovskaya S.Yu., Kozhevnikova M.V., Galitskaya P.Yu. Some challenges and opportunities for Russia and regions in terms of the global decarbonization trend // *Georesursy*. 2021. V. 23. No. 3. P. 8–16 (in Russian). doi: 10.18599/grs.2021.3.2
7. Lazarev V.M., Korneev D.A. The use of carbon farms for carbon dioxide fixation // *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*. 2021. V. 35. No. 2 (237). P. 7–9 (in Russian).
8. Expert – They attacked the carbon footprint [Internet resource] <https://expert.ru/expert/2020/43/napalinya-uglerodnyj-sled/> (Accessed: 01.12.2021).
9. Climate Action Tracker – Glasgow’s 2030 credibility gap: net zero’s lip service to climate action [Internet resource] <https://climateactiontracker.org/publications/glasgows-2030-credibility-gap-net-zeros-lip-service-to-climate-action/> (Accessed: 01.12.2021).
10. Zuev V.E., Komarov V.S. Modern problems of atmospheric optics. Volume 1. Statistical models of temperature and gas components of the atmosphere. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1986. 264 p. (in Russian).
11. Timofeev Yu.M., Vasiliev A.V. Theoretical foundations of atmospheric optics. Sankt-Peterburg: Nauka, 2003. 474 p. (in Russian).
12. Kuzmin V.A., Zagrai I.A., Desiatkov I.A. Monitoring the formation of nitrogen oxides in the furnace of a steam boiler for protection of atmospheric air from pollution // *Theoretical and Applied Ecology*. 2021. No. 3. P. 126–132 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-126-132
13. Kuzmin V.A., Zagrai I.A., Maratkanova E.I., Desiatkov I.A. Investigation of thermal radiation of furnace gases generated from solid-fuel combustion in a steam boiler // *Thermophysics and Aeromechanics*. 2019. V. 26. No. 2. P. 281–294. doi: 10.1134/S0869864319020112
14. Heat calculations for boilers. Guideline approach / Eds. N.V. Kuznetsov, V.V. Mitor, I.E. Dubovsky, E.S. Karasina. Moskva: Ekolit, 2011. 296 p. (in Russian).
15. Kuzmin V.A., Zagrai I.A., Desyatkov I.A. Research of dispersity and chemical composition of particles in the combustion products at gas-peat mixture burning in the steam boiler BKZ-210-140F // *Izvestia Vuzov. Problemy Energetiki*. 2016. No. 5–6. P. 55–63 (in Russian).
16. Kuzmin V.A., Zagray I.A., Rukavishnikova R.V. A comprehensive study of the thermal radiation of heterogeneous combustion products at the combustion of peat in power plants // *Teplovye protsessy v tekhnike*. 2015. V. 7. No. 10. P. 459–464 (in Russian).