

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, МАТЕРИАЛЫ
И ОБОРУДОВАНИЕ В ЭНЕРГЕТИКЕ

В трех томах

Том II

ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ И НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Монография

*Под общей редакцией
Э.Ю. Абдуллазянова, Э.В. Шамсутдинова*

Казань 2018

УДК 620.9
ББК 31
Н76

Рецензенты:

А.А. Калачев, д-р физ.-мат. наук, проф. РАН (КФТИ им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН);
А.А. Карасик, д-р хим. наук, проф. (ИОФХ им. Арбузова ФИЦ КазНЦ РАН);
А.А. Лопатин, канд. техн. наук, доц.
(Институт авиации, наземного транспорта и энергетики КНИТУ-КАИ)

Н76 Новые технологии, материалы и оборудование в энергетике. В 3 т.
Т. II. Инновационные решения и новые материалы: монография / под общ. ред.
Э.Ю. Абдуллазянова, Э.В. Шамсутдинова. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2018. –
422 с.

ISBN 978-5-89873-534-0 (т. 2)

ISBN 978-5-89873-532-6

В коллективной монографии «Новые технологии, материалы и оборудование в энергетике», посвященной 50-летию юбилею Казанского государственного энергетического университета, представлены результаты научных разработок, касающихся создания и использования новых технологий и оборудования в энергетике, а также рассмотрены вопросы совершенствования и применения в энергетической отрасли материалов с улучшенными эксплуатационными и экологическими характеристиками. Наряду с оригинальными разработками преподавателей КГЭУ в монографии представлены работы ряда ведущих отечественных и иностранных ученых.

Второй том монографии посвящен вопросам создания новых материалов для традиционной и возобновляемой энергетики, создания и использования инновационных решений и технологий при генерации, транспортировке и распределении тепловой и электрической энергии, а также эксплуатации теплообменного и иного оборудования на промышленных объектах.

Монография предназначена студентам старших курсов, магистрантам, аспирантам, научно-педагогическим работникам, а также работникам топливно-энергетического комплекса.

УДК 620.9

ББК 31

Авторы: С.Я. Алибеков, Н.К. Андреев, Е.П. Афанасьев, Г.Р. Ахметвалиева, Р.Т. Ахметгаряев, Н.У. Брукс, А.Н. Гавриленко, В.А. Геворкян, П.П. Гладышев, М.П. Горячев, М.Р. Джебрил, Ф.Ф. Динмухаметов, В.А. Довыденков, И.Р. Додов, Д.В. Ермолаев, А.Н. Закиров, Э.Р. Зверева, О.С. Зуева, Д.А. Иванов, В.Р. Иванова, В.К. Ильин, О.В. Ильин, И.С. Ислентьев, В.И. Капаев, О.В. Козелков, Б.В. Корзун, А.Г. Лаптев, Е.А. Лаптева, Т.В. Лопухова, А.О. Макарова, С.М. Маргулис, В.Л. Матухин, А. Мойя-Полл, Ю.К. Монгуш, А.М. Моржухин, С.В. Моржухина, Н.И. Москаленко, Н.С. Мочалов, Ф.Ф. Муллин, Р.Г. Назмитдинов, Н.В. Роженцова, О.С. Сироткин, Р.О. Сироткин, В.Р. Соболев, А.В. Танеева, А.Е. Усачев, Т.М. Фарахов, Р.В. Хабибуллина, А.И. Хайбуллина, М.С. Хамидуллина, Е.В. Шмидт, Д.М. Юдицкий, М.В. Ярмолык

ISBN 978-5-89873-534-0 (т. 2)

ISBN 978-5-89873-532-6

© Авторы, 2018

© Казанский государственный
энергетический университет, 2018

**СОДЕРЖАНИЕ ТОМОВ КОЛЛЕКТИВНОЙ МОНОГРАФИИ
«НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ
В ЭНЕРГЕТИКЕ»**

**ТОМ 1 «ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ
ИСТОЧНИКИ И МАЛАЯ ЭНЕРГЕТИКА»**

Раздел 1. Цифровые технологии в энергетике

Раздел 2. Возобновляемые источники энергии, водородная энергетика, топливные элементы, термоэлектричество

Раздел 3. Малая (распределенная) энергетика и автономные энергетические установки

**ТОМ 2 «ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ И НОВЫЕ
МАТЕРИАЛЫ»**

Раздел 1. Инновационные решения и технологии генерации, транспортировки и распределения тепловой и электрической энергии

Раздел 2. Новые материалы для энергетики

**ТОМ 3 «КАЧЕСТВО ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ,
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭКОЛОГИЯ»**

Раздел 1. Совершенствование систем мониторинга и контроля параметров надежности и качества энергоснабжения

Раздел 2. Ресурсосбережение, энергоэффективность и экология

ПРЕДИСЛОВИЕ

Энергетическая отрасль модернизируется стремительными темпами. В энергетической отрасли происходят преобразования, требующие внедрения высокоэффективных методов и создания инновационных, в том числе цифровых, технологий генерации, транспортировки и распределения тепловой и электрической энергии. Меняется структура отрасли, поскольку все большее значение приобретают малая (распределенная) и автономные источники энергии. Возникающие изменения приводят к необходимости создания и использования новых материалов. Все это диктует необходимость своевременного информирования научно-технической общественности о соответствующих тенденциях в данной области.

В состоящей из трех томов коллективной монографии «Новые технологии, материалы и оборудование в энергетике», посвященной 50-летию юбилею Казанского государственного энергетического университета, представлены результаты научных разработок по созданию и использованию новых технологий и оборудования в энергетике, а также рассмотрены вопросы совершенствования и применения в энергетической отрасли материалов с улучшенными эксплуатационными и экологическими характеристиками. Наряду с оригинальными разработками преподавателей ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» в монографии представлены работы ряда ведущих отечественных и иностранных ученых.

Второй том коллективной монографии «Новые технологии, материалы и оборудование в энергетике» посвящен вопросам создания новых материалов для традиционной и возобновляемой энергетики, создания и использования инновационных решений и технологий при генерации, транспортировке и распределении тепловой и электрической энергии, а также эксплуатации теплообменного и иного оборудования на промышленных объектах.

Первый раздел посвящен инновациям в средствах учета электроэнергии и системах управления освещением, использованию технологии сенсорных сетей для интеллектуализации воздушных линий электропередач. Представлены результаты исследований процессов газификации высоковязкого углеводородного сырья, реологических свойств топлив, а также использования присадок на предприятиях

топливно-энергетического комплекса. Представлены методы моделирования интенсификации теплообмена в каналах энергетического оборудования, процессов тепломассопереноса в миниградирнях, радиационного теплообмена в камерах сгорания энергетических агрегатов. Даны концепция защиты оборудования подстанций от волн грозовых перенапряжений, набегających с линий электропередачи, и модели диагностики силового трансформатора. Рассмотрены перспективы использования гибридных солнечных систем с тепловыми насосами для энергообеспечения домов в России, а также возможность применения прямого управления моментом в электроприводах штанговых насосных установок.

Второй раздел посвящен вопросам создания и использования новых материалов энергетики, в том числе возобновляемой, а также новых сорбционных материалов для хроматографического контроля технологических процессов на объектах энергетики.

Авторы выражают признательность рецензентам – руководителю КФТИ им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН проф. РАН А.А. Калачеву, руководителю ИОФХ им. Арбузова ФИЦ КазНЦ РАН профессору А.А. Карасику, директору Института авиации, наземного транспорта и энергетики КНИТУ-КАИ доценту А.А. Лопатину за полезные предложения, которые учтены при подготовке настоящего издания. Замечания и отзывы просьба направлять по адресу: 420066, Казань, ул. Красносельская, д. 51, Казанский государственный энергетический университет.

Авторы

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННОГО ТЕПЛООБМЕНА В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ АГРЕГАТОВ

Н.И. Москаленко, И.Р. Додов, М.С. Хамидуллина

Введение

В настоящей работе рассматривается применение численного моделирования для решения задач радиационного теплообмена в структурно-неоднородных двухфазных средах, которые реализуются при сгорании топлива в котельных агрегатах, атмосферных выбросах от аэроносителей, при движении аэроносителей со сверхзвуковыми скоростями, при лесных пожарах. Оптически активные ингредиенты газовой фазы продуктов сгорания обладают острой селекцией спектральных линий поглощения (излучения), что вызывает отличие функций спектрального пропускания (ФСП) для селективного излучения среды распространения излучения от ФСП для источников неселективного излучения (серое тело). При наличии дисперсной фазы в газовой среде острой селекции подвергается такой параметр среды распространения излучения как «вероятность выживания кванта». Число спектральных линий, определяющих ФСП, возрастает с ростом температуры и при высоких температурах определяется сотнями тысяч линий. При решении задач радиационного теплообмена методом численного моделирования необходимо знать параметры спектральных линий (ПСЛ), интенсивности, полуширины, положение центров, контуры и их зависимости от температуры. При высоких температурах продуктов горения $T > 2000$ К необходим учет неравновесности излучения, когда колебательная температура различных ингредиентов отличается от газокинетической. В связи с громоздкостью численного моделирования радиационного теплообмена по ПСЛ актуальна разработка приближенных методов расчета, когда параметры ФСП из данных эксперимента, выполненного при различных температурах на пламенных измерительных комплексах. В настоящей работе рассмотрено замкнутое моделирование радиационного теплообмена в топочных камерах, когда вычисляется сначала поле температуры в камерах сгорания, а затем потоки теплового излучения на трубные тепловоспринимающие поверхности.

Параметризация радиационных характеристик

Основными оптически-активными компонентами продуктов сгорания углеводородных топлив являются водяной пар, углекислый газ, OH, CO, оксиды азота NO, NO₂, дисперсная фаза продуктов сгорания, представляющая собой частицы сажи и минеральной фракции выгоревшего топлива. Для газовых компонентов продуктов сгорания ФСП вычисляются двухпараметрическим методом эквивалентных масс [1–3], позволяющим решать задачи радиационного теплообмена в структурно-неоднородных средах. ФСП $\tau_{\Delta\nu i}$ для компонента i определяется из соотношения:

$$\left(\frac{1}{\ln \tau_{\Delta\nu i}}\right)^2 = \left(\frac{1}{\ln \tau'_{\Delta\nu i}}\right)^2 + \left(\frac{1}{\ln \tau''_{\Delta\nu i}}\right)^2 + \frac{M_i}{\ln \tau'_{\Delta\nu i} \ln \tau''_{\Delta\nu i}}, \quad (1.99)$$

где

$$\begin{aligned} |\ln \tau'_{\Delta\nu i}| &= \int_L k_{\Delta\nu i} F_1[L(T)] P_i(L) dL, \\ |\ln \tau''_{\Delta\nu i}| &= \left[\int \beta_i P_i(L) P_3^{n_i/m_i}(L) F_2^{1/m_i}(L) dL \right]^m, \end{aligned} \quad (1.100)$$

$n_i, m_i, k_{\Delta\nu i}, \beta_{\Delta\nu i}, M_i$ – эмпирические параметры ФСП по спектру волнового числа ν :

$$\tau_{\Delta\nu} = \exp\left[-\sum_i \ln \tau_{\Delta\nu i}\right], \quad (1.101)$$

$F_1(T), F_2(T)$ – температурные зависимости $k_{\Delta\nu i}/k_{\Delta\nu 0}, \beta_{\Delta\nu i}/\beta_{\Delta\nu 0}$.

В соотношении (1.100) P_3 – эффективное давление:

$$P_3 = P_{N_2} + \sum_k B_{ik} P_k, \quad (1.102)$$

где B_{ik} – фактор уширения спектральных линий для столкновений молекул i с молекулой k : для кислорода и углекислого газа $B(O_2) = 0,8$, $B(CO_2) = 1,4–1,6$; для водяного пара $B(H_2O) \in [6,30]$ и значительно зависит от температуры.

Параметр M определяет скорость перехода ФСП от аппроксимации слабого поглощения к аппроксимации сильного поглощения. При перекрытии спектральных линий выполняется закон Бугера для ФСП, когда $k_{\Delta v}(T) = \beta_{\Delta v}(T)$, $m = 1$, $n = 0$, $M = -1$. Для полос с индуцированным давлением поглощения и континуального поглощения излучения крыльями СЛП $m = n = 1$, $M = -1$, $k^H_{\Delta v}(T) = \beta_{\Delta v}$. Для произвольной ФСП $m \in \{0,1\}$, $n \in \{0,1\}$, $M \in \{0,-1\}$.

Для многокомпонентной неоднородной среды:

$$|\ln \tau'_{i\Delta v}| = \int_L \kappa_{i\Delta v}(T) \rho[L(T)] dL, \quad (1.103)$$

$$|\ln \tau''_{i\Delta v}| = \left\{ \int_L \beta_{i\Delta v}^{1/m_i}(T) \rho_i[L(T)] P_{i\vartheta}^{n_i/m_i}(L) dL \right\}^{m_i}, \quad (1.104)$$

$$|\ln \tau_{\Delta v}| = \sum_i |\ln \tau_{i\Delta v}[L(T)]|, \quad (1.105)$$

$$\tau_{\Delta v} = \exp \left[- \sum_i \ln \tau_{i\Delta v}[L(T)] \right]. \quad (1.106)$$

Параметризация ФСП определяется для газовых оптически активных ингредиентов, уширенных азотом. Учет воздействия на ФСП уширения СЛП при столкновениях с молекулами других компонентов реализуются введением эффективного давления:

$$P_{i\vartheta} = P_{N_2} + \sum_k B_{ik} [L(T)] P_k(L), \quad (1.107)$$

где $B_{ik} = \alpha_{0i}(i-k) / \alpha_{0i}(i-N_2)$, $\alpha_{0i}(i-k)$, $\alpha_{0i}(i-N_2)$ – приведенные к давлению $P=1$ атм полуширины линий для столкновения молекул $(i-k)$ и $(i-N_2)$.

Дисперсная фаза продуктов сгорания учитывается в соответствии с экспериментальными данными [6] по микроструктуре сажевого золя и его концентрации. Необходимые для расчетов параметры (эффективные сечения поглощения, рассеяния, индикатрисы рассеяния) вычислены в соответствии с микроструктурой сажевого золя и используются в расчетных схемах. Для применения в камерных топках при использовании каменных углей подготовлена электронная

библиотека оптических характеристик сажевого и минерального зольей различной микроструктуры в виде гамма-распределений с модальными радиусами r_m от 0,003 до 10 мкм.

При выполнении расчетов радиационного теплообмена использовался широкий комплекс экспериментальных исследований, выполненных на пламенных и подогревных измерительных комплексах с электрическим обогревом в диапазоне температур 1500–2500 К [1–10]. В результате этих исследований выявлено влияние неравновесных процессов на радиационный теплообмен [1–3], исследованы радиационные характеристики водяного пара в спектральной области 0,2–25 мкм [11], определены ФСП и параметры спектральных линий и подготовлены высокотемпературные атласы параметров спектральных линий CO_2 [12]. Экологическое влияние атмосферных антропогенных выбросов рассмотрено в [13–16, 18]. Численное моделирование сложного радиационного теплообмена с решением задачи переноса селективного излучения аэроносителей в атмосфере рассмотрено в [17, 22, 23]. В [19, 21] рассмотрена математическая модель моделирования радиационного теплообмена с учетом неравновесности и селективности излучения в топках котельных агрегатов. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания вычисляются по [20]. Процессы сажеобразования и выгорания сажи проанализированы в [24–26]. В последние годы достигнут значительный прогресс в области тонкоструктурной спектроскопии, в том числе и компонентов продуктов сгорания органических топлив, и радиационному теплообмену в структурно неоднородных многокомпонентных средах, в том числе и высокотемпературных. Для этих целей созданы электронные базы данных [28–31] на уровне международной кооперации различных научных групп с включением параметров СЛП, в том числе и для CO_2 , CO , SO_2 , паров H_2O , OH , NO , NO_2 . Возможность их применения для решения задач радиационного теплообмена для высокотемпературных сред в камерах сгорания энергетических агрегатов предстоит определить в будущем.

Данные по численному моделированию ФСП по параметрам спектральных линий могут успешно использоваться для получения параметров ФСП по приближенным методам расчета: моделям полос поглощения, двухпараметрическому методу эквивалентной массы. Для примера на рис. 1.81 приведены ФСП CO_2 в области спектра 450–1450 см^{-1} для $P_{\text{CO}_2} = 1$ атм, $T = 300$ К для различных содержаний CO_2 W от 0,03 до 3000000 атм·см.

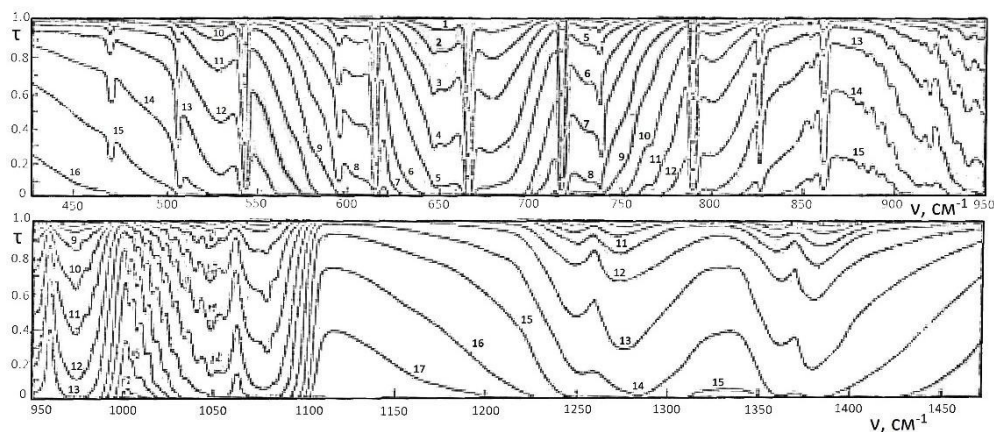


Рис. 1.81. Вычисленные МЧМ (сплошные кривые) и измеренные (точки) спектры поглощения излучения CO_2 в спектральном диапазоне $450\text{--}1450\text{ см}^{-1}$ для содержания W , атм·см: 1–0,03; 2–0,1; 3–0,3; 4–1; 5–3; 6–10; 7–30; 8–100; 10–1000; 11–5000; 12–10000; 13–30000; 14–100000; 15–300000; 16–1000000; 17–3000000;
 $P_{\text{CO}_2} = 1\text{ атм}, T=300\text{ К}$

На рис. 1.82 иллюстрируются спектральные коэффициенты поглощения CO и NO , вычисленные по высокотемпературным атласам ПСЛ для температур 300, 600, 1200, 1800, 2500, 3000 К.

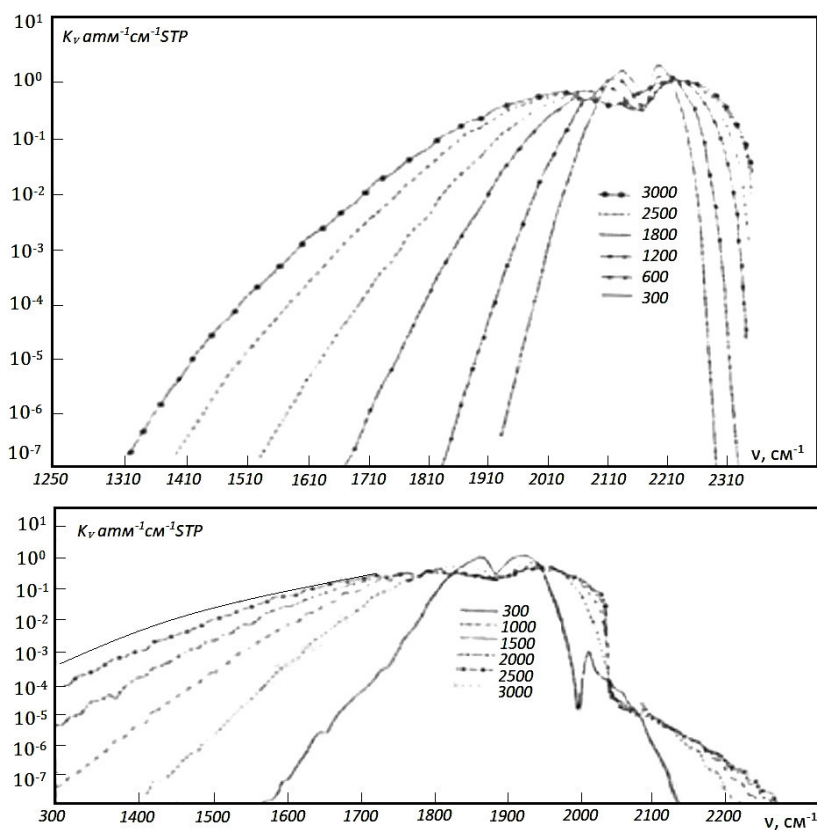


Рис. 1.82. Коэффициент поглощения в основных полосах $4,67\text{ мкм}$ CO (а) и $4,54\text{ мкм}$ NO (б) в диапазоне температур $300\text{--}3000\text{ К}$

На рис. 1.83 представлены спектры поглощения CO при содержании 1 и 10 атм·см при температурах 300, 1200 и 3000 К и ФСП CO в диапазоне содержаний на оптическом пути от 0,01 до 10000 атм см при температуре 300 К. Наблюдается расширение основной полосы CO с ростом температуры при сохранении интегральной интенсивности полосы $S_{\text{и}}(T) = \text{const}$.

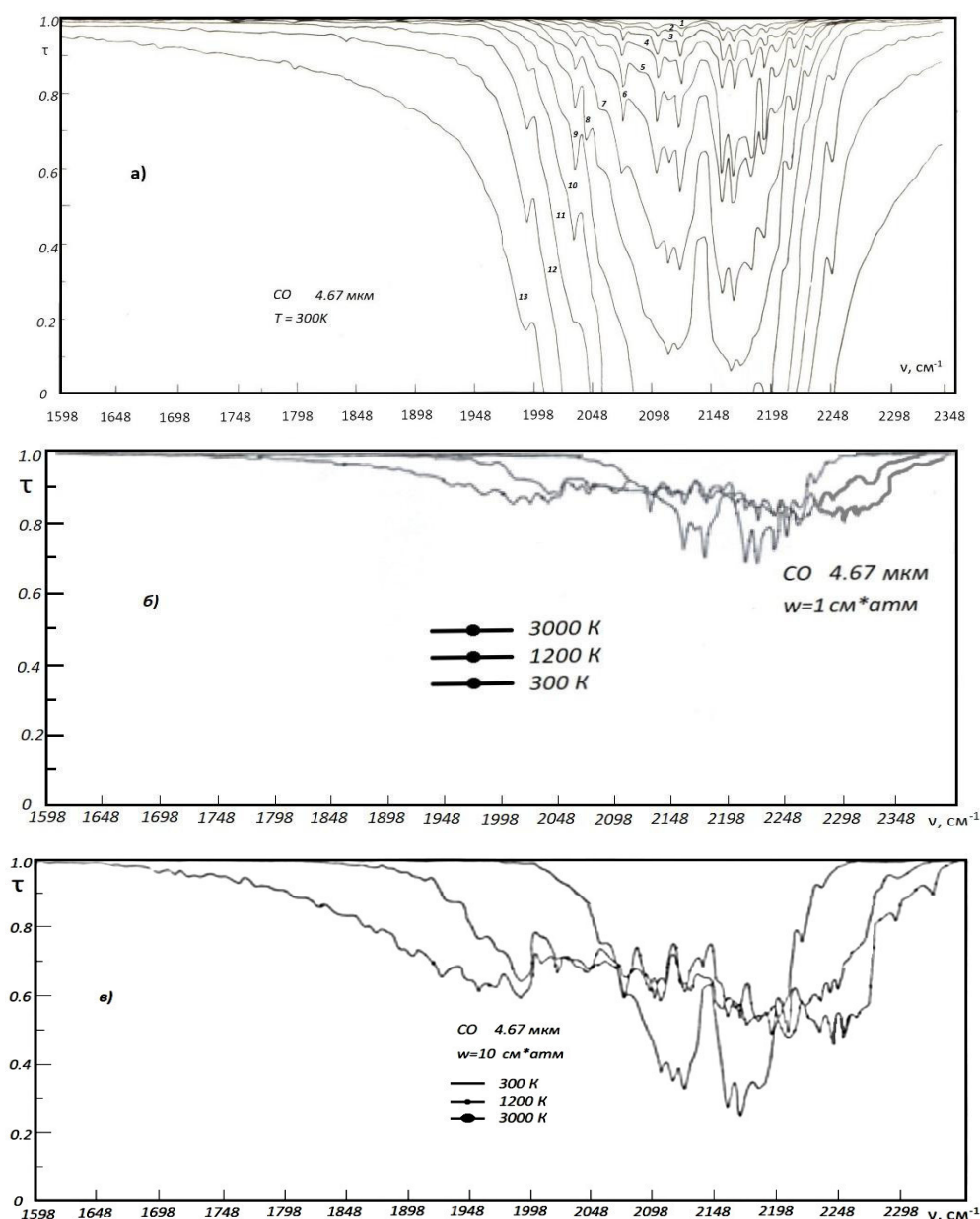


Рис. 1.83. Функции спектрального пропускания τ_{ν} CO в основной полосе 4,67 мкм, вычисленные МЧМ: *а* – для содержания W_{CO} , атм·см; 1–0,01; 2–0,03; 3–0,1; 4–0,3; 5–1; 6–3; 7–10; 8–30; 9–100; 10–300; 11–1000; 12–3000; 13–10000; *б* – для температур 300, 1200, 3000 К при $W_{\text{CO}}=1$ атм·см STP; *в* – для температур 300, 1200, 3000 К при $W_{\text{CO}} = 10$ атм· см STP. Спектральное разрешение $\Delta\nu = 10 \text{ см}^{-1}$

Замкнутое моделирование радиационного теплообмена в многокамерных топках

В настоящее время есть две возможности повышения эффективности радиационного теплообмена в топках и паропроизводительности котельных установок: увеличение числа горелок в топке с созданием сильных радиационных контрастов отдельных пламен на общем тепловом фоне продуктов сгорания в топке; создание многокамерных топок, где увеличение эффективности радиационного теплообмена достигается за счет сохранения габаритов топочной камеры многокамерной конструкции. Второй вариант более эффективен, допускает широкое многообразие конструктивных решений и позволяет конструировать паровые котлы с естественной и принудительной циркуляцией, а также позволяет применять смешанные формы циркуляции. Многокамерные топки могут использоваться для сжигания твердых топлив. В этом случае перспективно применение в котельных установках сжигание топлива в циклонных предтопках, позволяющих очистить продукты сгорания от зольной составляющей продуктов сгорания и шлаков. Сама топочная камера в этом случае является фактически радиационным теплообменником, который для повышения эффективности радиационного выхолаживания продуктов сгорания выполняется многокамерным.

Согласно разработанной нами математической модели радиационного теплообмена, радиационное выхолаживание в топке определяется скоростью радиационного выхолаживания $\partial T/\partial t$ (t – время) и временем пребывания продуктов сгорания в топке так, что температура на выходе из топки определяется соотношением

$$T_{\text{вых}} = T_a - \int_0^H \frac{dT}{dt}(z) \frac{dz}{v(z)}, \quad (1.108)$$

где T_a – адиабатическая температура продуктов сгорания, $v(z)$ – скорость движения продуктов сгорания; зависящая от координаты z с изменением температуры $T(z)$ по ходу движения продуктов сгорания. Из соотношения (1.103) следует, что с увеличением тепловой нагрузки топки температура на выходе из топки возрастает. Наибольшее радиационное выхолаживание будет наблюдаться при применении подовых горелочных устройств, обеспечивающих максимальное время пребывания продуктов сгорания в топке. Для заданной высоты топки

и ее размеров повышение паропроизводительности котла можно достигнуть путем увеличения скорости радиационного выхолаживания $\partial T/\partial t$, которая достигается снижением поперечного сечения отдельных камер в многокамерной топке.

При решении задач радиационного теплообмена в теплоагрегатах будем оперировать интегральными интенсивностями $J^{\uparrow\downarrow}(z_H, Q_H, \phi_H)$:

$$J^{\uparrow}(z_H, \theta_H, \phi_H) = \int_0^{\infty} J\lambda^{\uparrow}(z_H, \theta_H, \phi_H) d\lambda, \quad (1.109)$$

$$J^{\downarrow}(z_H, \theta_H, \phi_H) = \int_0^{\infty} J\lambda^{\downarrow}(z_H, \theta_H, \phi_H) d\lambda, \quad (1.110)$$

где $J_{\lambda}^{\uparrow\downarrow}(z_H, Q_H, \phi_H)$ – спектральные интенсивности теплового излучения, Z_H – высота наблюдения, Q_H, ϕ_H – зенитный и азимутальный углы визирования, соответственно.

Проинтегрировав $J^{\uparrow\downarrow}(z_H, Q_H, \phi_H)$ в пределах телесного угла 2π , получим для потоков теплового излучения соотношения:

$$J^{\uparrow\downarrow}(z_H) = \int_0^{2\pi} J^{\uparrow\downarrow}(z, \theta, \phi) d\Omega, \quad (1.111)$$

где $d\Omega$ – элемент телесного угла. Скорость радиационного выхолаживания dT/dt определяется соотношением:

$$\frac{\partial T(z, \theta, \phi)}{\partial t} = \frac{1}{\rho(z, \theta, \phi) C_p(z, \theta, \phi)} \cdot \frac{\partial F(z, \theta, \phi)}{\partial z}, \quad (1.112)$$

где $\rho(z, Q, \phi), C_p(z, Q, \phi)$ – соответственно плотность и теплоемкость в локальной точке с координатами z, Q, ϕ . Обозначим:

$$F(z, \theta, \phi) = F^{\uparrow}(z, \theta, \phi) - F^{\downarrow}(z, \theta, \phi). \quad (1.113)$$

Наиболее эффективно радиационное выхолаживание проявляется в ядре факела, в связи с чем его температура на 15–20 % ниже адиабатической. Это означает, что за время сгорания топлива факел значительно остывает в результате радиационного выхолаживания.

Эти результаты подтверждаются теоретическими расчетами, выполненными по разработанной математической модели, учитывающей влияние неравновесных процессов на радиационный теплообмен.

Для формирования короткого пламени целесообразно использовать многорядные горелочные устройства, где подача воздуха и топлива чередуются и осуществляются через капиллярные трубки, вмонтированные в матричного типа горелочное устройство.

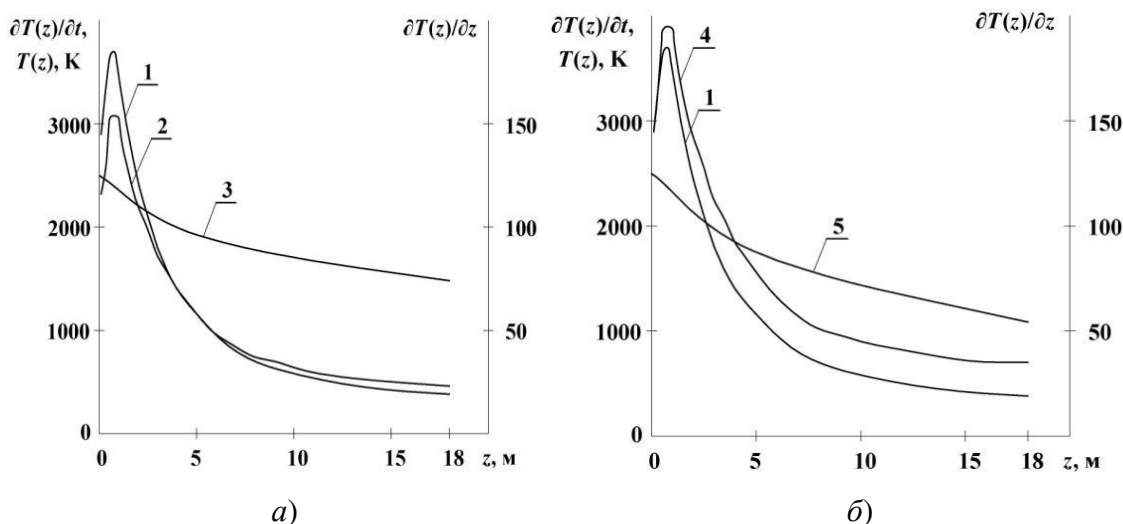


Рис. 1.84. Результаты расчета радиационного теплообмена в многокамерной топке с размером горизонтального сечения ячейки $1,25 \times 1,6 \text{ м}^2$ при начальной средней скорости течения продуктов сгорания: а – 25 м/с; б – 20 м/с;

1 – $\partial T(z)/\partial t$; 2 – $\partial T(z)/\partial z$; 3 – $T(z)$; 4 – $\partial T(z)/\partial z$; 5 – $T(z)$

На рис. 1.84 приведены примеры расчетов вертикальных профилей скоростей радиационного выхолаживания $dT(z)/dt$, $dT(z)/dz$ от высоты z над срезами капилляров матричного горелочного устройства. Топливо – природный газ, размер горизонтального сечения ячейки многокамерной топки $1,25 \times 1,6 \text{ м}^2$. Скорость продуктов сгорания на начальном участке 25 м/с и 20 м/с при давлении в топке $1 \cdot 10^5 \text{ Па}$, высота пламенной зоны $\Delta z = 0,7 \text{ м}$. В расчетах учтено равновесное и неравновесное радиационное выхолаживание. Предполагается, что процесс горения различных ингредиентов газового топлива происходит независимо при оптимальном значении коэффициента избытка воздуха $\alpha = 1,03$. Объемные коэффициенты ослабления, поглощения и рассеяния нормированы на измеренные значения оптической плотности золя [1–3].

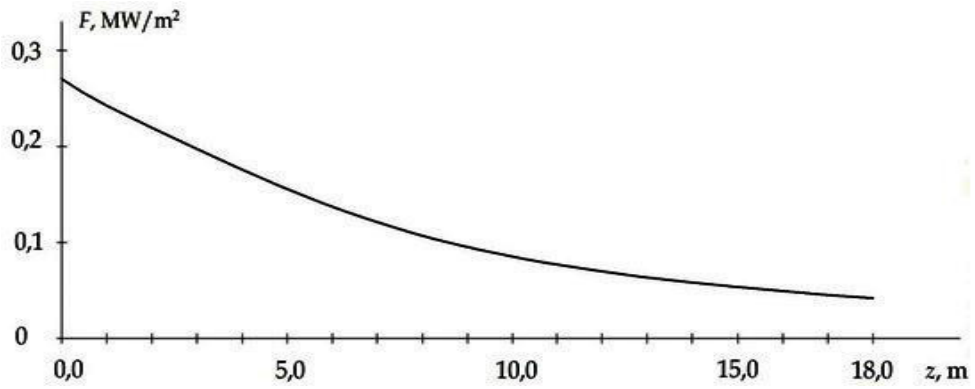


Рис. 1.85. Распределение интегрального потока излучения в зависимости от высоты в камере сгорания в случае слабого поглощения

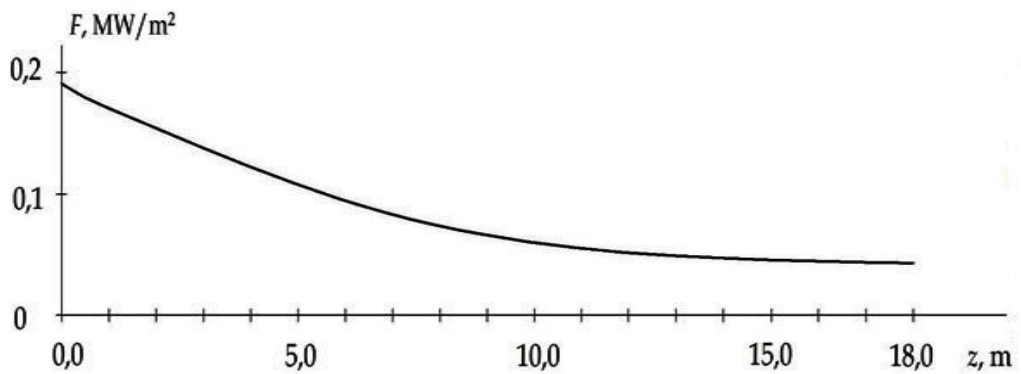


Рис. 1.86. Распределение интегрального потока излучения в зависимости от высоты в камере сгорания, рассчитанного с использованием функции спектрального пропускания по двухпараметрическому методу эквивалентных масс

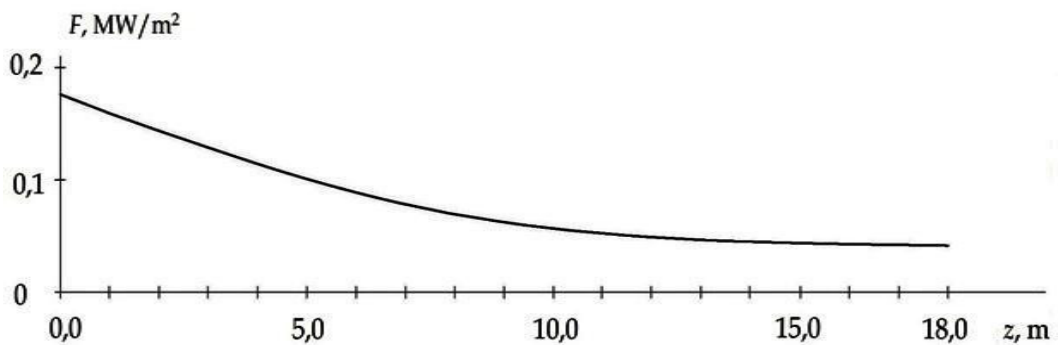


Рис. 1.87. Распределение интегрального потока излучения в зависимости от высоты в камере сгорания, рассчитанного без учета эффективного давления

На рис. 1.85–1.87 приведены распределения интегрального потока $F(z)$ в зависимости от высоты в камере сгорания, рассчитанного с использованием функций спектрального пропускания по двухпараметрическому методу эквивалентных масс и приближению «слабого поглощения».

С появлением суперкомпьютеров становится возможным применение численных методов решения задач переноса излучения [9]. Их применение ограничено недостаточной надежностью сведений по параметрам спектральных линий газовых компонентов продуктов сгорания при высоких температурах, реализуемых в камерах сгорания энергетических агрегатов.

При выполнении расчетов радиационного теплообмена использован двухпараметрический метод эквивалентной массы при вычислении спектральных интенсивностей теплового излучения [1, 4, 6–9].

Наиболее высокая радиационная нагрузка наблюдается в нижней части топки и на матричное многорядное горелочное устройство, которое выполняется с охлаждением водой по независимому контуру циркуляции.

Для топок с твердым топливом расчеты выполнены с циклонными предтопками. Расчеты выполняются с учетом сажевой дисперсной фазы, вклад которой в радиационный теплообмен является значительным.

Сгорание твердого топлива мелкого дробления в циклонных предтопках позволит наиболее эффективно улавливать золу в пределах предтопки. На рис. 1.85 представлена функциональная схема ячейки многокамерной топки с циклонными предтопками. Каждая ячейка многокамерной топки имеет две циклонные предтопки. Число ячеек определяет полную производительность котельной установки. Предполагается встречная подача продуктов сгорания из предтопок в рабочую камеру, которая в этом случае является теплообменником. Закрученные встречные потоки продуктов сгорания разбиваются и заполняют камеру. Тангенциальная скорость движения потоков резко снижается, и кинетическая энергия движения потоков переходит в тепловую. Далее происходит радиационный теплообмен в камере при течении продуктов сгорания топлива и передача энергии излучения на трубные тепловоспринимающие поверхности.

В табл. 1.22 представлены зависимости от высоты z в топочной камере температуры $T(z)$; скорости радиационного выхолаживания $dT(z)/dt$, К/с; скорости движения потоков $V(z)$, м/с; скорость изменения температуры от высоты $z dT/dz$, К/м. В табл. 1.22

$$\frac{dT}{dz} = \frac{\Delta T}{\Delta z},$$

$$V(z) = V_0 \frac{T(z)}{T_0(z)}.$$

Таблица 1.22

Результаты расчетов зависимости параметров топочной камеры
от высоты z

z , м	$T(z)$, К	$\frac{dT(z)}{dz}$, К/м	$V(z)$, м/с	$\frac{dT}{dz}$, К/м
0	1 940	1960	14	
1	1 800	1820	13	140
2	1 720	1380	12,41	80
3	1 665	885	12	55
4	1 615	638	11,6	50
5	1 570	568	11,3	45
6	1 525	436	10,89	45
7	1 480	374	10,68	40
8	1 440	354	10,48	40
9	1 405	331	10,21	35
10	1 370	310	9,95	35
11	1 340	292	9,74	30
12	1 310	286	9,53	30
13	1 285	234	9,35	25
14	1 260	229	9,16	25
15	1 235	224	8,98	25
16	1 210	220	8,80	25
17	1 190	189	8,66	20
18	1 170	170	8,51	20
19	1 150	167	8,37	20
20	1 130	164	8,23	20

В качестве топлива используется кузнецкий шлак следующего химического состава в рабочей массе: $W^P = 26,5 \%$, $A^P = 10,2 \%$, $C^P = 54,39 \%$, $H^P = 3,9 \%$, $S^P = 0,5 \%$, $N^P = 1,6 \%$. Расчетный КПД котла составляет 91 %, температура перегретого пара $T_{\text{III}} = 560$ К, коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,08$, температура пароводяной смеси на входе $T_0 = 215$ К, давление $P_{\text{III}} = 13,9$ МПа. Для котла с паропроизводительностью $D = 210$ т/ч соответствует топливоподача $B = 5$ кг/с. Для многокамерной топки из четырех ячеек и восьми предтопок в каждой предтопке сгорает 0,625 кг/с угля. При скорости подачи топлива в предтопке 100 м/с радиус предтопки составляет $r = 0,32$ м. Для котла производительностью по пару $D = 420$ т/ч радиус предтопки составит 0,45 м.

Объемы продуктов сгорания вычислялись в следующем порядке: по концентрациям горящих компонентов вычисляется их масса, затем вычислялась масса кислорода для их сжигания. По концентрации кислорода определяется объем воздуха с учетом того, что концентрация $C(O_2) = 21 \%$.

Сечение ячейки радиационного теплообменника определяется начальной температурой и начальной скоростью продуктов сгорания, а также топливопроизводительностью предтопок. Например, для котла производительностью 210 т/ч, если число ячеек четыре, размер ячейки в горизонтальном сечении составляет $1,6 \times 6 \text{ м}^2$.

Данные по температурному профилю $T(z)$ и химическому составу продуктов сгорания используются для выполнения расчетов потоков излучения продуктов сгорания на тепловоспринимающие поверхности (экраны).

Циклонные топки с жидким шлакоудалением имеют ряд преимуществ перед обычными топками. Основное их преимущество – высокая плотность тепловыделения, что приводит к уменьшению габаритов котла. Высокая степень удаления золы топлива до 90 % дает возможность интенсифицировать работу конвективных поверхностей нагрева и увеличивает время непрерывной наработки радиационного пароперегревателя, уменьшает шлакование. Использование пыли грубого помола позволяет уменьшить затраты на топливоприготовление. К их основным недостаткам следует отнести затруднения при сжигании топлив с низким уровнем летучих и высоковлажных топлив, повышенный расход электроэнергии на дутье, повышенные потери теплоты со шлаком [32].

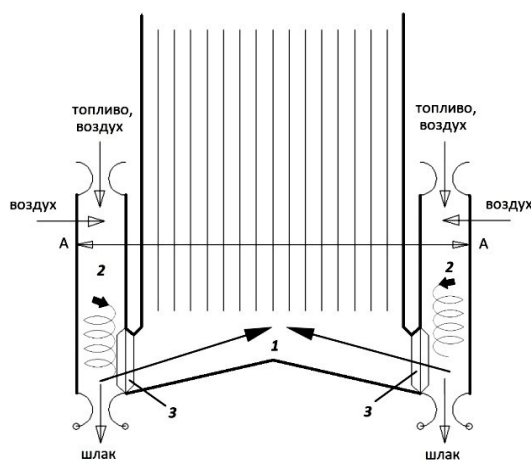


Рис. 1.88. Структурная схема ячейки топочной камеры многокамерной топки на твердом топливе: 1 – радиационный теплообменник ячейки многокамерной топки; 2 – циклонная предтопка; 3 – шлакоулавливающее устройство

На рис. 1.88 представлены температурные зависимости $T(z)$ для начальных скоростей истечения продуктов сгорания V_0 : 14 м/с, 21 м/с, 28 м/с в ячейке многокамерной топки с горизонтальным сечением $1,6 \times 6 \text{ м}^2$.

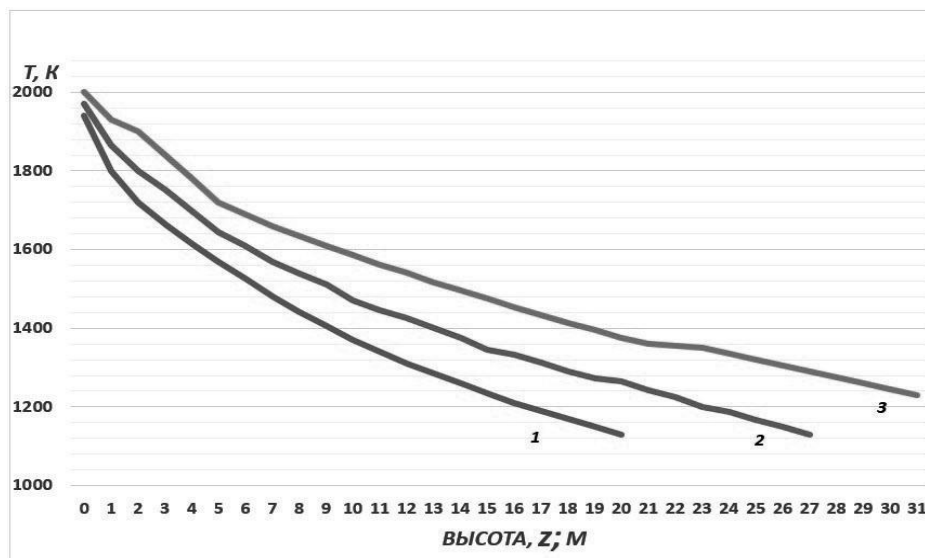


Рис. 1.89. Зависимости температуры $T(z)$ для начальной скорости истечения продуктов сгорания $V_0(z)$, м/с: 1–14; 2–21; 3–28

В заключение остановимся на основных результатах, полученных в настоящей работе.

Разработан метод моделирования переноса теплового излучения в многокомпонентной неоднородной по структурным характеристикам атмосферы топочного пространства. Предложены конструкции многокамерных топок с восходящим движением продуктов сгорания и вертикальным развитием пламени подовых, многорядных, формирующих единое для всех камер многокамерной топки горелочное устройство матричного типа с общим газовым коллектором для подачи топлива и коллектора для подачи окислителя (воздуха или кислорода). Горелочное устройство целесообразно выполнить с радиатором для охлаждения его водой по независимому циркуляционному контуру. Конструкция многокамерной топки при использовании газового топлива позволяет повысить коэффициент полезного действия на 2–3 % и увеличить его производительность в 2–3 раза при сохранении параметров пара и габаритов котла.

Выполнено замкнутое моделирование радиационного теплообмена в камере сгорания многокамерной топки с горизонтальным сечением ячейки $1,25 \times 1,6 \text{ м}^2$ и $1,4 \times 1,4 \text{ м}^2$ при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,03$ и средней начальной скорости продуктов сгорания 25 и 20 м/с.

Получены сведения по скоростям радиационного выхолаживания dT/dt , dT/dz и температурному профилю $T(z)$ в зависимости от высоты z над срезами капилляров матричного горелочного устройства. Выполнены расчеты тепловосприятия по тепловоспринимающим поверхностям топочной камеры. Полный поток F теплового излучения на поверхности топки согласуется с изменением энтальпии на выходе из топки с погрешностью 0,3 %. Неравновесное радиационное выхолаживание составляет 7,5 %. Учет эффективного давления в топке приводит к росту полного потока излучения F на 5–6 %.

Для котлов многокамерной конструкции, работающих на твердом топливе, целесообразно применение конструкции с циклонными предтопками, создающие встречные потоки продуктов сгорания. Рабочая камера в этом случае является теплообменником с трубными тепловоспринимающими поверхностями при восходящем течении продуктов сгорания.

Список литературы

1. Москаленко Н.И., Мирумянц С.О., Локтев Н.Ф., Мисбахов Р.Ш. Равновесные и неравновесные процессы излучения: высокотемпературные среды, радиационный теплообмен. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2014. 260 с.
2. Москаленко Н.И., Зарипов А.В., Ильин Ю.А. Исследование спектров неравновесной эмиссии гидроксидов // Известия высших учебных заведений. Физика. 2010. № 2. С. 3–9.
3. Moskalenko N.I., Zaripov A.V., Loctev N.F., Parzhin S.N., Zagidullin R.A. Transfer over of nonequilibrium radiation in flames and high-temperature mediums // Intechweb. Optoelectronics – devises and applications. – Croatia, 2011. P. 469–526.
4. Москаленко Н.И., Ильин Ю.А., Каюмова Г.В. Измерительный комплекс высокого спектрального разрешения для исследований пламени // Журнал прикладной спектроскопии. 1992. Т. 56. № 1. С. 122–127.
5. Москаленко Н.И., Локтев Н.Ф. Оптические методы измерения температуры пламени и продуктов сгорания // Проблемы энерго- и ресурсосбережения: сб. научных статей. – Саратов: РИЦ СГТУ, 2009. С. 147–153.
6. Москаленко Н.И., Сафиуллина Я.С., Загидуллин Р.А. Микроструктура и радиационные характеристики сажевого золя в пламенах и антропогенных выбросах продуктов сгорания // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2013. № 5–6. С. 23–32.
7. Москаленко Н.И., Мирумянц С.О., Паржин С.Н., Додов И.Р. Измерительный комплекс для исследований спектров поглощения газовых сред при высоких давлениях // Журнал прикладной спектроскопии. 2016. Т. 83. № 3. С. 457–461.

8. Москаленко Н.И., Мирумянц С.О., Паржин С.Н., Додов И.Р. Спектральные установки с криогенной светосильной многоходовой газовой кюветой для исследования поглощения излучения газовыми средами // Журнал прикладной спектроскопии. 2016. Т. 83. № 5. С. 832–836.
9. Москаленко Н.И., Ильин Ю.А., Садыкова М.С. Исследование спектров эмиссии и поглощения излучения водяным паром // Известия высших учебных заведений. Физика. 2014. Т. 57. № 9. С. 3–8.
10. Москаленко Н.И., Зарипов А.В., Локтев Н.Ф., Ильин Ю.А. Излучательные характеристики водород-кислородного пламени // Журнал прикладной спектроскопии. 2010. Т. 77. № 3. С. 407–415.
11. Moskalenko N.I., Zaripov A.V., Loktev N.F., Parzhin N.S., Zagidullin R.A. Transfer over of nonequilibrium radiation in flames and high – temperature mediums // Intechweb.Optoelectronics – devises and applications. – Croatia, 2010. P. 469–526.
12. Москаленко Н.И., Зотов О.В., Ильин Ю.А., Паржин С.Н., Хамидуллина М.С. Комплексное исследование спектров поглощения и излучения углекислого газа // Известия вузов. Физика. 2016. Т. 59. № 12. С. 35–41.
13. Москаленко Н.И., Мисбахов Р.Ш., Багаутдинов И.З., Локтев Н.Ф., Додов И. Р. Определение ингредиентного состава атмосферных выбросов продуктов сгорания турбореактивного двигателя методом тонкоструктурной спектроскопии // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2016. № 3. С. 116–121.
14. Москаленко Н.И., Садыкова М.С., Сафиуллина Я.С. Моделирование радиационного теплообмена в средах, возмущенных сильными антропогенными и природными воздействиями. I. Структурные и математические модели // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2014. № 3–4. С. 28–37.
15. Москаленко Н.И., Хамидуллина М.С., Сафиуллина Я.С. Моделирование радиационного теплообмена в средах, возмущенных сильными антропогенными и природными воздействиями. II. Пылевые и дымовые выносы в тропосферу // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2014. № 7–8. С. 3–12.
16. Москаленко Н.И., Хамидуллина М.С., Сафиуллина Я.С. Моделирование радиационного теплообмена в средах, возмущенных сильными антропогенными и природными воздействиями. III. Возможные климатические последствия постядерных конфликтов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2014. № 9–10. С. 21–30.
17. Москаленко Н.И., Родионов Л.В., Хамидуллина М.С., Афанасьев И.А. Численное моделирование сложного радиационного теплообмена // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015. № 1–2. С. 33–43.
18. Москаленко Н.И., Додов И.Р., Локтев Н.Ф. Применение метода тонкоструктурной спектроскопии для определения ингредиентного состава атмосферных выбросов авиационных турбореактивных двигателей // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: труды XX школы-семинара мол. ученых и специалистов. – Звенигород: Изд. дом МЭИ, 2015. С. 229–232.

19. Москаленко Н.И., Загидуллин Р.А., Зарипов А.В., Локтев Н.Ф. Моделирование радиационного теплообмена с учетом неравновесности и селективности излучения в топках энергетических котлов тепловых электрических станций. I. Математическая модель // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2012. № 1–2. С. 23–33.
20. Аммасов В.Е., Дрегаллин А.Ф., Тишин А.П. и др. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания. М.: ВИНТИ. 1972. 490 с.
21. Москаленко Н.И., Зарипов А.В., Загидуллин Р.А. Спектры эмиссии и радиационный теплообмен в высокотемпературных средах, пламенах и топочных камерах // Техника и технологии в XXI веке: современное состояние и перспективы развития: монография. – Новосибирск: ЦРНС, 2009. С. 48–88.
22. Москаленко Н.И., Садыкова М.С. Метод численного моделирования в задачах сложного радиационного теплообмена // НКЭ-2014: сб. материалов докл. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2014. Т. 3. С. 262–272.
23. Афанасьев И.А., Москаленко Н.И., Багаутдинов И.З. Полуширины спектральных линий водяного пара для численного моделирования сложного радиационного теплообмена // НКЭ-2014: сб. материалов докл. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2014. Т. 3. С. 52–59.
24. Бакиров Ф.Г., Захаров В.М., Полищук И.З., Шайхутдинов З.Г. Образование и выгорание сажи при сжигании углеводородных топлив. М.: Машиностроение, 1989. 128 с.
25. Левтеров А.М., Левтерова Л.И. Анализ математических моделей механизмов сажеобразования при сжигании углеводородных топлив // Вістник НТУ. 2013. № 5. С. 130–141.
26. Marig Matti. Coagulation dynamics of fractal-like soot aggregates // Journal of Aérosol Science. 2007. Vol. 38(2). P. 141–156.
27. Васильева О.В., Ксенофонтов С.И., Краснова А.Г., Кокшина А.В. Структура и свойства сажи в пламени углеводородного топлива // Альтернативная энергетика и экология. 2015. № 19. С. 105–111.
28. Rothman L.S. et al. The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database // Journ. Quantit. Spectros. Radiat. Transfer. 2005. Vol. 96. P. 139–204.
29. Rothman L.S. et al. The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database // Journ. Quantit. Spectros. Radiat. Transfer. 2009. Vol. 110. P. 533–572.
30. Rothman L.S. et al. The HITRAN 2012 molecular spectroscopic database // Journ. Quantit. Spectros. Radiat. Transfer. 2013. Vol. 130. P. 4–50.
31. Rothman L.S. et al. The HITRAN 2016 molecular spectroscopic database // Journ. Quantit. Spectros. Radiat. Transfer. 2017. Vol. 203. P. 3–69.
32. Сандомирский Л.Н., Юринев В.Н. Котельные установки промышленных предприятий. М.: Энергоатомиздат, 1989. 538 с.