

ВЛИЯНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА РАДИАЦИОННОГО ТЕПЛОПЕРЕНОСА НА РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГОРЕЛОЧНОГО УСТРОЙСТВА ПО ДОЖИГАНИЮ АНОДНЫХ ГАЗОВ ЭЛЕКТРОЛИЗНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Литвинцев К. Ю.^{1,2}, Дектерев А.А.^{1,2}, Необъявляющий П.А.³

¹Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

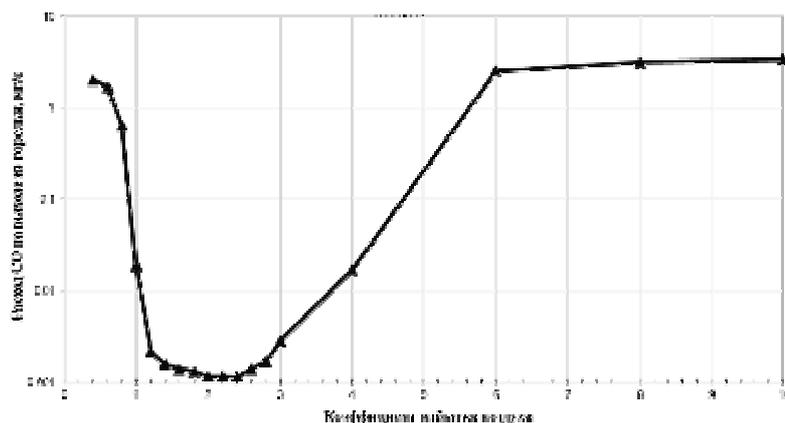
²Институт Теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

³ООО «ТОРИНС», Красноярск, Россия

В выбросах алюминиевого завода доля электролизного производства составляет более 80%. Значительная часть из них приходится на анодные газы, состоящие в основном из окиси углерода СО и смолистых веществ. Основным способом в обезвреживании анодного газа электролизного производства является термический метод – сжигание. Для самообжигающихся анодов электролизера Содерберга основная роль в ликвидации вредного воздействия газо-смолистых выбросов в окружающую среду отводится горелочным устройствам. Анодный газ поступает из подколокольного пространства электролизёра в горелки, где происходит его дожигание. Горелка представляет собой устройство для дожигания анодных газов с внешним подсосом воздуха, реализуемым за счет разряжения, создаваемого в газоходной системе. Такой тип горелок называют щелевыми (Рис. 1а). Сложность эксплуатации горелочных устройств обусловлена нестабильностью параметров газа электролизного производства (температура, расход и состав анодных газов, разрежение в газоходной системе). Поэтому оценка эффективности работы горелки производится по ее способности максимального дожигания СО в максимально широком диапазоне рабочих условий. Одно из основных условий работы горелки – это уровень разряжения в горелочном устройстве, который определяет количество воздуха (коэффициент избытка воздуха), поступающего в область горения (Рис. 1б) [1].



а)



б)

Рис. 1. Горелочное устройство для дожигания анодных газов: а) вид щелевой горелки б) график эффективности работы горелки.

Расчет горелки (рис. 2а) проводился на программном комплексе «SigmaFlow», предназначенном для расчета задач вычислительной гидродинамики [2]. На основе предварительно проведенных экспериментов были выбраны параметры работы горелки,

при которых было проведено численное моделирование. Для описания процессов, протекающих в горелочном устройстве, в рамках пакета «SigmaFlow» использовались: модифицированная k-ε модель турбулентности, гибридная модель горения с одностадийной реакцией окисления CO, SIMPLE процедура расщепления для описания связи между полями скорости и давления.

В рамках одного из режимов работы горелочного устройства (анодный газ содержит CO - 30% и имеет $T_{\text{вх}} = 600^{\circ}\text{C}$, расход на выходе из горелки $Q_{\text{вых}} = 145 \text{ нм}^3/\text{ч}$, коэффициент избытка воздуха равен двум) проводилась настройка параметров радиационной модели. В программном комплексе «SigmaFlow» реализованы следующие методы решения уравнения радиационного теплопереноса (1): диффузионное приближение, конечно-объемный метод (КОМ), дискретно-ординатный метод (ДОМ) [3, 4].

$$\frac{dI_{\nu}(\vec{r}, \vec{s})}{ds} = -\beta_{\nu}(\vec{r})I_{\nu}(\vec{r}, \vec{s}) + \kappa_{\nu}(\vec{r})I_{b\nu}(\vec{r}) + \frac{\sigma(\vec{r})}{4\pi} \int_{4\pi} I_{\nu}(\vec{r}, \vec{s}') \Phi_{\nu}(\vec{s}', \vec{s}) d\Omega' \quad (1)$$

КОМ и ДОМ относятся к методам дискретных направлений, которые основаны на разделении пространственного и углового распределения интенсивности излучения. В этом случае уравнение радиационного переноса (УРТ) сводится к нескольким связанным между собой обыкновенным линейным дифференциальным уравнениям относительно интенсивностей, осредненных по пространству, в заданных направлениях излучения. Эти методы на данный момент получили широкое распространение для решения задач лучистого теплопереноса. ДОМ и КОМ являются с одной стороны достаточно универсальными методами, с точки зрения области применения, с другой не настолько ресурсоемкими как, например, методы Монте-Карло. КОМ, по сравнению с ДОМ, является более сложным в реализации методом, однако, он корректнее описывает рассеяние и поддерживает возможность угловой многоблочности. Достоинствами диффузионного приближения являются низкие требования к вычислительным ресурсам и его совместимость с методами расчета аэродинамики и теплопереноса. Однако область применения диффузионного приближения ограничена средами со слабо анизотропными оптическими свойствами.

Для расчета коэффициента поглощения нами используются приближения «серого» газа, WSGG модели и полосные модели на базе данных спектральных свойств веществ HITRAN (High-resolution TRANsmission molecular absorption database) [5]. В базе HITRAN содержатся данные по свойствам излучения газов в спектральных линиях, на основе которых рассчитываются спектральные коэффициенты поглощения для выбранных газов. При расчете спектрального коэффициента поглощения учитывается только ударное уширение.

$$\kappa_{\nu} = C_N \frac{S}{\pi} \frac{\gamma}{(\nu - \nu_0)^2 + \gamma} \quad (2)$$

Полученные значения коэффициента поглощения из решения уравнения (2) табулируются в виде функции температуры, парциального давления и частоты излучения. При решении конкретных задач спектр излучения разбивается на спектральные интервалы, внутри которых на основе созданной базы данных происходит осреднение коэффициента поглощения

На первом этапе расчетов горелочного устройства для определения коэффициентов поглощения использовалось приближение «серого» газа, при этом для решения УРТ (рис. 2б) сравнивались различные методы. Несмотря на то, что для всех методов поля температур подобны, использование диффузионного приближения приводит к более низким температурам, чем при расчетах КОМ и ДОМ методами, максимальное отклонение в средней температуре по высоте горелки составляет 20%. Различия результатов КОМ и ДОМ методов между собой минимальны и не превышают 1%.

Необходимо отметить, что в случае использования приближения «серого» газа можно использовать достаточно малое количество дискретных направлений, так расчеты, проведенные для КОМ с 8 и 32 направлениями, практически идентичны, то же самое справедливо и для ДОМ с 8 и 48 направлениями (Рис. 2в).

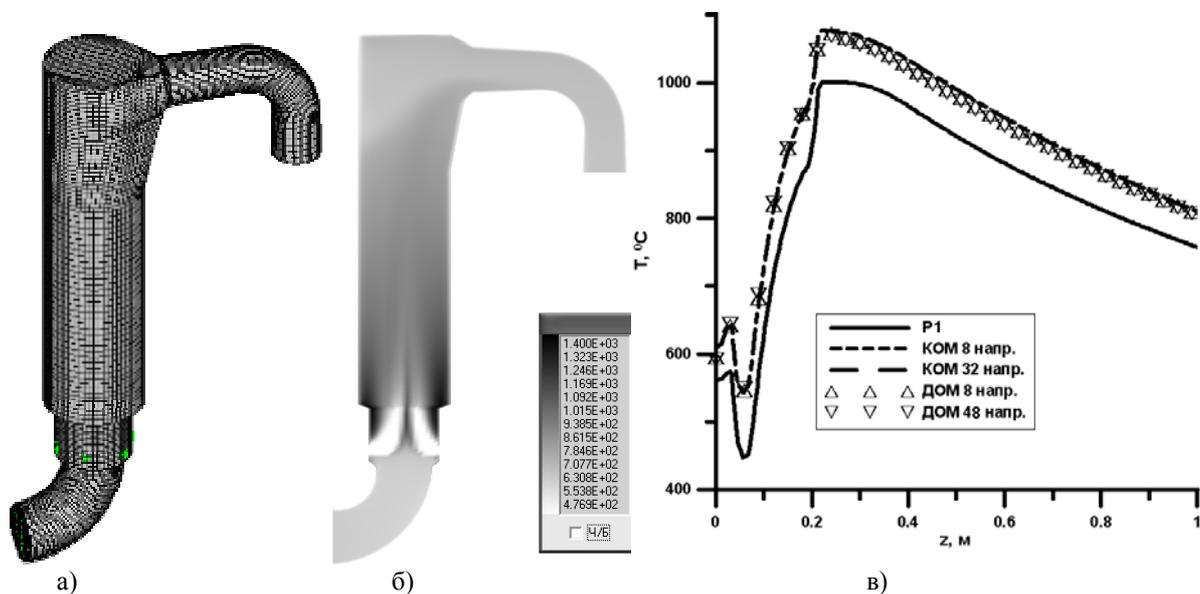


Рис. 2. Моделирование горелочного устройства, модель «серого» газа: а) геометрия и расчетная сетка; б) поле температуры, °С. ДОМ 48 напр.; в) распределение средней температуры по высоте горелки.

Использование моделей коэффициента поглощения, учитывающих спектральные свойства газов, приводит к существенному изменению поля температур. Сильно снижаются тепловые потери газа, область горения анодных газов увеличивается. По сравнению с результатами, полученными в приближении «серого» газа в центральной зоне горелки средняя температура повышается более чем на 100⁰С (Рис. 3а). Средняя температура для 15-ти полосной модели немного выше, чем для WSGG, но в целом отличия между ними минимальны (Рис. 3а).

Для уменьшения времени расчета при использовании спектральных моделей авторами разработан комбинированный метод решения уравнения (1). В комбинированном методе для части спектральных полос используется диффузионное приближение, а для части – КОМ метод. Для ряда задач комбинированный метод позволяет существенно снизить вычислительные затраты без снижения точности полученных результатов. В случае горелочного устройства такой подход использовался для WSGG модели коэффициента поглощения. Использование комбинированного метода позволило на четверть снизить затраты на решение УРТ. Однако при этом наблюдаются некоторые отличия от КОМ метода по температуре в зоне смешения холодного воздуха с анодным газом (Рис. 3б). В этой области сильно снижается средняя температура по сравнению с расчетом, использующим только КОМ, приблизительно на 80⁰С. Такая величина близка к варианту с использованием диффузионного приближения. Это связано с тем, что в этой зоне высокотемпературная излучающая область имеет малый характерный размер, и, таким образом, несмотря на высокое значение коэффициента поглощения для первого «серого» газа в WSGG модели, среда для диффузионного приближения не является оптически толстой. Выше зоны смешения различия по температуре не столь велики – не более 20⁰С.

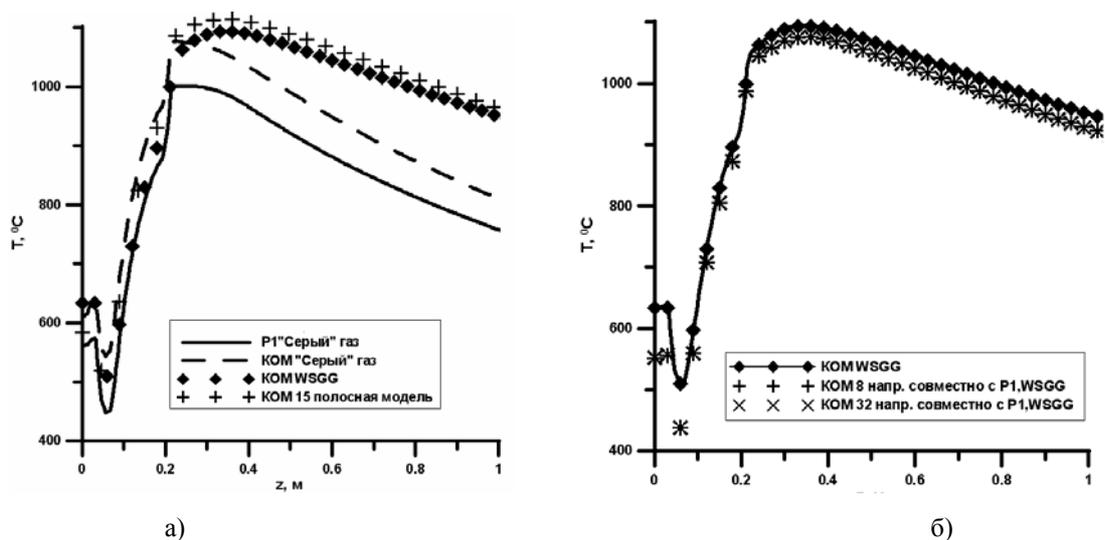


Рис. 3. Распределение средней температуры по высоте горелки: а) сравнение моделей коэффициента поглощения и методов решения УРТ; б) сравнение КОМ с комбинированным методом.

В рамках работы по совершенствованию горелочных устройств были проведены испытания горелок, проведено моделирование и выполнено сравнение расчетных данных с экспериментом. В ходе испытаний были выполнены замеры теплотехнических параметров и концентраций газов в горелочных устройствах. В процессе электролиза происходило изменение режимов технологического процесса, соответственно менялись как газовый состав и расход анодных газов, так и подсос воздуха. Поэтому измеренные параметры газа поступающего в горелку располагались в определенном диапазоне (Таблица 1).

Таблица 1.
Данные экспериментальных измерений на входе в горелку

Величина	Значения
CO ₂ , %	27-38
CO, %	26-33
T, $^{\circ}\text{C}$	800-820

Так как результаты эксперимента представляли собой диапазон данных, то для сравнения с результатами экспериментов расчеты проводились для двух значений концентраций CO: 26% и 33%. Расход анодного газа составлял 40 $\text{нм}^3/\text{ч}$., подсос воздуха через щели горелки равнялся 87,8 $\text{нм}^3/\text{ч}$., температура на входе принималась равной 800 $^{\circ}\text{C}$.

Несмотря на более низкие расходы по сравнению с рассчитанным ранее вариантом горелки и более высокую входную температуру анодного газа, характер горения не изменился, основное выгорание CO происходит вблизи стенок горелки. Снижение концентрации CO на входе с 33% до 26% приводит к падению температуры на величину порядка 100 $^{\circ}\text{C}$.

Результаты сравнения подтверждают ранее сделанные выводы по используемым моделям коэффициент поглощения. В целом поля температур для представленных полосных моделей и WSGG модели коэффициента поглощения близки, разница в среднем составляет величину порядка 10 $^{\circ}\text{C}$. Основные отличия наблюдаются вблизи входа в горелку, в этой области радиационные тепловые потери в полосных моделях выше. Это связано с тем, что в WSGG модели Смита коэффициент поглощения рассчитывается по концентрациям CO₂ и H₂O, таким образом, не учитывается наличие большого количества CO в анодном газе. Это приводит к занижению коэффициента поглощения и в конечном

счете немного большей средней температуре в горелке по сравнению с полосными моделями.

В таблице 2 приведены результаты сравнения данных эксперимента с данными расчетов с использованием различных моделей коэффициента поглощения

Таблица 2.

Сравнение данных эксперимента с данными расчетов

Точки мониторинга	Замеряемая величина	Расчетные значения на разных моделях			Данные эксперимента
		WSGG	15ти полосная модель	«серый» газ	
на высоте 1м	$T, ^\circ\text{C}$	800-900	790-890	640-700	780-990
на выходе	$T, ^\circ\text{C}$	670-750	660-740	500-550	620-845

В целом видно, что использование спектральных моделей коэффициента поглощения при расчете горелочного устройства позволяет получать температурные поля, соответствующие данным эксперимента. Расхождения в температурных диапазонах в эксперименте и расчетах связано с тем, что расчет не рассмотрены все режимы работы горелки, так, например, при увеличении общего расхода с $107,8 \text{ м}^3/\text{ч}$ до $120 \text{ м}^3/\text{ч}$ температура в среднем вырастает на $20-30 ^\circ\text{C}$. Использование же модели «серого» газа приводит к сильному занижению температуры по сравнению с экспериментальными данными, что позволяет сделать вывод о ее неприменимости для решения данной задачи.

Использование комбинированного подхода для WSGG модели приводит к небольшому снижению температуры. Как отмечалось ранее, это связано с ошибкой, возникающей при использовании диффузионного приближения в области перемешивания анодного газа и воздуха. Использование комбинированного подхода для моделирования горелочного устройства целесообразно при достаточно больших концентрациях CO в анодном газе, более 20%, и не слишком больших значениях давления разряжения.

Таким образом, при моделировании работы подобного рода горелочных устройств радиационный теплоперенос не просто играет важную роль в процессе теплообмена, но и требует учета спектральных свойств газа и анизотропии поля излучения.

Список обозначений

I_ν – интенсивность излучения, $\text{Вт}/\text{м}^2$; $I_{b\nu}$ интенсивность спектрального излучения абсолютно черного тела, $\text{Вт}/\text{м}^2$; σ – коэффициент рассеивания, м^{-1} ; κ_ν – спектральный коэффициент поглощения, м^{-1} ; β_ν – коэффициент затухания ($\beta_\nu = \kappa_\nu + \sigma$), м^{-1} ; Ω – телесный угол, рад; \vec{r} – радиус-вектор, м; \vec{S} – угловое направление, м; Φ_ν – функция рассеивания; S – интегральная интенсивность линии, $\text{м}^{-1}/(\text{молекула}\cdot\text{м}^{-2})$; γ – полуширина линии, см^{-1} ; C_N – концентрация молекул газа (молекула/ м^3).

Список литературы:

1. Дектерев А.А., Необъявляющий П.А. и др. Расчетно-экспериментальное исследование горелочного устройства по дожиганию анодного газа //Теплофизика и аэромеханика. 2007, том 14, № 1, с. 151-160.
2. Литвинцев К.Ю., Дектерев А.А. и др. Использование программы SigmaFlow для численного исследования технологических объектов //Совместный выпуск: Вычислительные технологии, Региональный вестник Востока, по материалам международной конференции «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании». Т. 1. Ч.1. 2003 г. С. 250-256

3. Litvintsev K. Yu., Dekterev A. A. Comparison of the Finite-Volume and Discrete-Ordinate Methods and Diffusion Approximation for the Radiative //Heat Transfer Equation. 2008, Vol. 68, pp. 653-655.
4. Chai J. C., Rath P. Discrete-Ordinates and Finite-Volume Methods for Radiation Heat Transfer //International Workshop on Discrete-Ordinates and Finite-Volume Methods for Radiation Heat Transfer. Guwahati : Indian Institute of Technology. – 2006.
5. Rothman L. at al. The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database //Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2005. Vol. 96. pp. 139-204.