

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ НАЛИЧИИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

¹Аскарова Алия Сандыбаевна, ¹Болегенова Сымбат Алихановна, ¹Максимов Валерий Юрьевич

¹Казахский национальный университет имени аль-Фараби

NUMERICAL MODELING OF HEAT AND MASS TRANSFER IN THE PRESENCE OF PHYSICAL AND CHEMICAL PROCESSES

К исследованию процессов тепло-массопереноса при наличии физико-химических превращений в настоящее время наблюдается повышенный интерес. Эти процессы протекают в условиях сильной неизотермичности и турбулентности течения, многофазности среды, существенного влияния нелинейных эффектов теплового излучения, межфазного взаимодействия и многостадийности протекающих при этом химических реакций.

At the present time there is an increased interest to the study of heat-and-mass transfer in high temperature environments in the presence of burning. These processes occur in strong turbulent and non-isothermal flows, multiphase fluids, in the conditions of significant impact of nonlinear effects of thermal radiation, interfacial interactions and multistage chemical.

Ключевые слова: горения, тепло-массопереноса, топлива.

Keywords: combustion, heat and mass transfer, fuel.

Тепло-массоперенос при наличии физико-химических превращений это взаимодействие турбулентных движений и химических процессов. Для исследования этих сложных течений необходимо использовать результаты современных теоретических исследований из таких областей науки как гидродинамика, термодинамика, аэротермохимия, вычислительная гидродинамика, компьютерное и численное моделирование.

Для описания процессов тепло-массопереноса в высокотемпературных и химически реагирующих потоках при наличии горения необходимо использовать математическую модель, которая представляет собой систему неавтономных трехмерных нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных. В эту сложную систему входят уравнения неразрывности и состояния вязкой среды, уравнения движения, переноса тепла и компонентов реагирующей смеси и продуктов химических реакций.

В этой связи особую значимость приобретают математическое моделирование и вычислительный эксперимент, создание новых расчетных моделей, которые адекватно описывают физико-химические процессы при горении и разработка численных методов исследования.

Прогресс в построении эффективных вычислительных алгоритмов при исследовании задач о тепло-массопереносе в физико-химически реагирующих средах позволил решить множество задач, имеющих огромное практическое приложение для различных отраслей промышленности. Именно разработка адекватных реальному процессу математических, физических и химических моделей, методов их решения и проведения вычислительных экспериментов на реальных теплоэнергетических установках, позволили создать оптимизированные технологически чистые процессы и системы с рациональным использованием энергетических ресурсов [1].

Численному моделированию аэродинамики и горения в топочных и технологических устройствах, огневому моделированию пылеугольных топков и горению натурального твердого топлива посвящены работы [2-3]. Авторы отмечают, что пылеугольный факел в современных камерах сгорания в газодинамическом отношении представляет собой трехмерную (криволинейную) турбулентную струю сжимаемого газа, движущуюся в условиях горения и интенсивного теплообмена с окружающими поверхностями. Это, а также слабая изученность кинетики химических реакций и незавершенность теории турбулентности значительно усложняют построение расчетных схем для исследования реагирующих течений в топочных камерах.

Математическая модель теплообмена и горения пылеугольного топлива на основе движения неизотермического несжимаемого многокомпонентного газа в топочной камере разработана в работе [4]. Течение в данной математической модели считается установившимся, а уравнения стационарными, что позволило авторам работы рассчитать задачи о стационарном и нестационарном, ламинарном и турбулентном течении с химическими реакциями и сложным теплообменом.

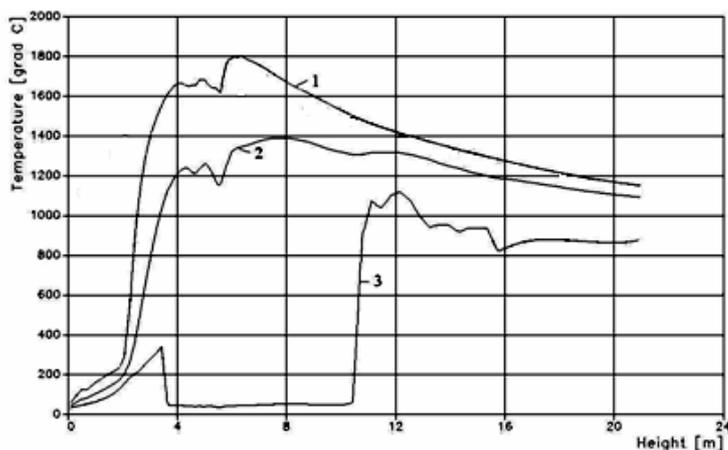
Изучение горения жидких, газообразных и твердых топлив является сложной задачей, так как требует учета большого количества сложных взаимосвязанных процессов и явлений: многоступенчатые цепные химические реакции, конвективный перенос импульса, тепла и массы, молекулярный перенос, излучение, турбулентность, испарение, воспламенение и многофазность [5-6].

Процессы теплопереноса в камерах сгорания являются нестационарными, при которых происходит непрерывное изменение скоростных, температурных и концентрационных полей, скоростей реакций и химического состояния реагирующих компонент. Это усложняет не только экспериментальное исследование таких течений, но и создание более или менее строгой теории. Такие процессы математически описываются сложной системой нелинейных дифференциальных уравнений, которая для областей реальной геометрии, аналитического решения не имеет [7-8].

Изучение закономерностей таких течений имеет важное фундаментальное значение при построении теории физики горения и взрыва и огромную практическую направленность при создании новых физико-химических технологий и при разработке технологических процессов и систем с рациональным использованием энергетических ресурсов.

Для исследования процессов теплопереноса чаще всего используют хорошо известные методы теории турбулентных струй, когда исследователи применяют заранее подобранные профили скорости или температуры, интегральные законы сохранения импульса, теплосодержания и т.п. При этом выбранные профили с достаточным приближением аппроксимируют экспериментальные профили.

В связи со значительным прогрессом в развитии численных методов исследования теплопереноса при наличии физико-химических процессов, в разработке физико-математических методов и программного обеспечения, с увеличением мощности современной вычислительной техники появились результаты по трехмерному моделированию процессов теплообмена и для областей реальной геометрии.



1 - максимальные; 2 - средние; 3 - минимальные в поперечном сечении камеры сгорания значения температуры;

Рисунок 1—Распределение температуры Т по высоте камеры сгорания

На рисунке 1 приведены распределения максимальных, средних и минимальных в поперечном сечении значений температур по высоте камеры сгорания. Анализ температурных кривых показывает, что в зоне пояса горелок имеются области максимумов и минимумов значений температуры, что можно объяснить технологией сжигания топлива. Максимумы температуры связаны с зоной реакции горения - это ядро пылегазового факела.

Когда топливо и окислитель встречаются происходят воспламенение и химические реакции горения с большим выделением тепла. Здесь же имеем и минимумы значений температуры, которые связаны с низкой температурой топливной аэрозмеси и воздуха, поступающих через горелки в камеру сгорания. Такое поведение температуры подтверждается трехмерным графиком, представленным на рисунке 2. Этот график позволяют определить по цветной шкале значения температур в любой точке камеры сгорания.

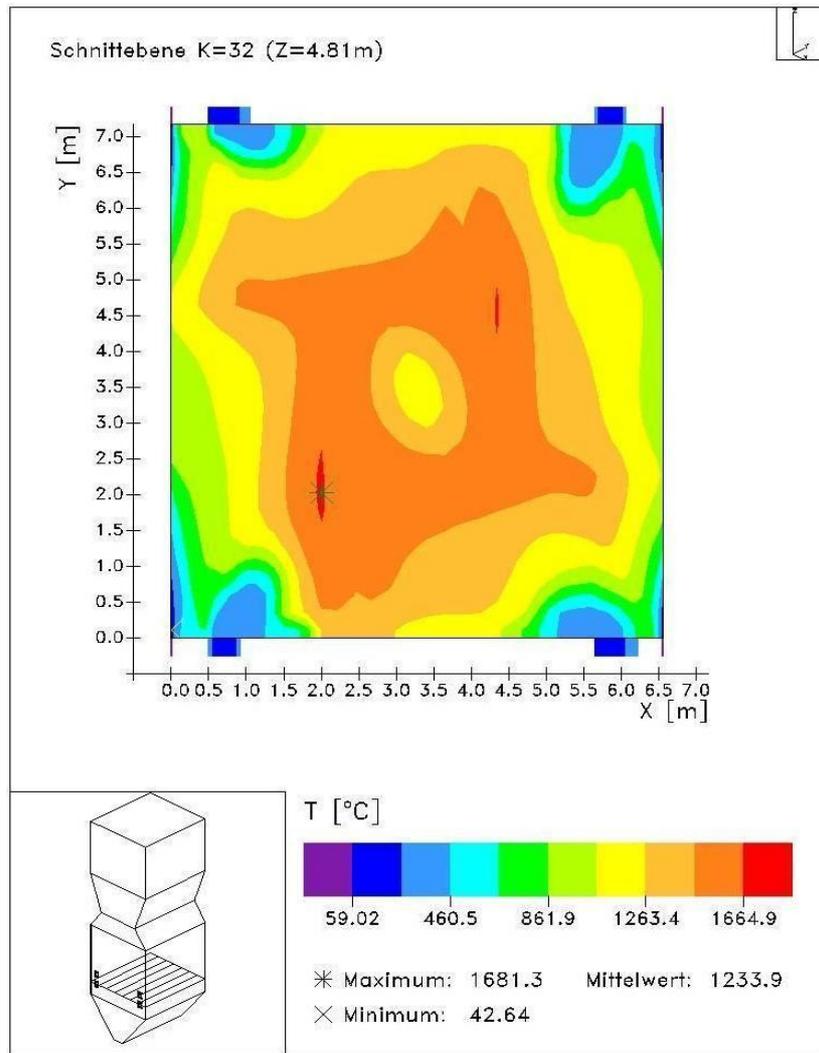


Рисунок 2–Распределение температуры T в поперечном сечении камеры сгорания в зоне горелок нижнего яруса ($h=4.81\text{м}$)

Мы видим, что в области расположения горелок (рисунок 2) имеем как максимальное значения температур ($\sim 1681^{\circ}\text{C}$), так и минимальное их значение ($\sim 43^{\circ}\text{C}$). На трехмерном графике распределения температуры на выходе из камеры сгорания мы уже не наблюдаем такого сильного различия в значениях температур ($T_{\max}=1152^{\circ}\text{C}$, $T_{\min}=879^{\circ}\text{C}$). При движении к выходу из топки, химические реакции ослабевают, температура падает и на выходе из камеры сгорания ($k=102$, $h=20,96\text{м}$) мы имеем максимальное значение температуры, равное 1152°C , и среднее значение температуры, равное 1092.9°C (рисунок 3), что соответствует измеренным значениям температуры непосредственно на ТЭЦ ($T_{\text{эксп}} \approx 1200^{\circ}\text{C}$).

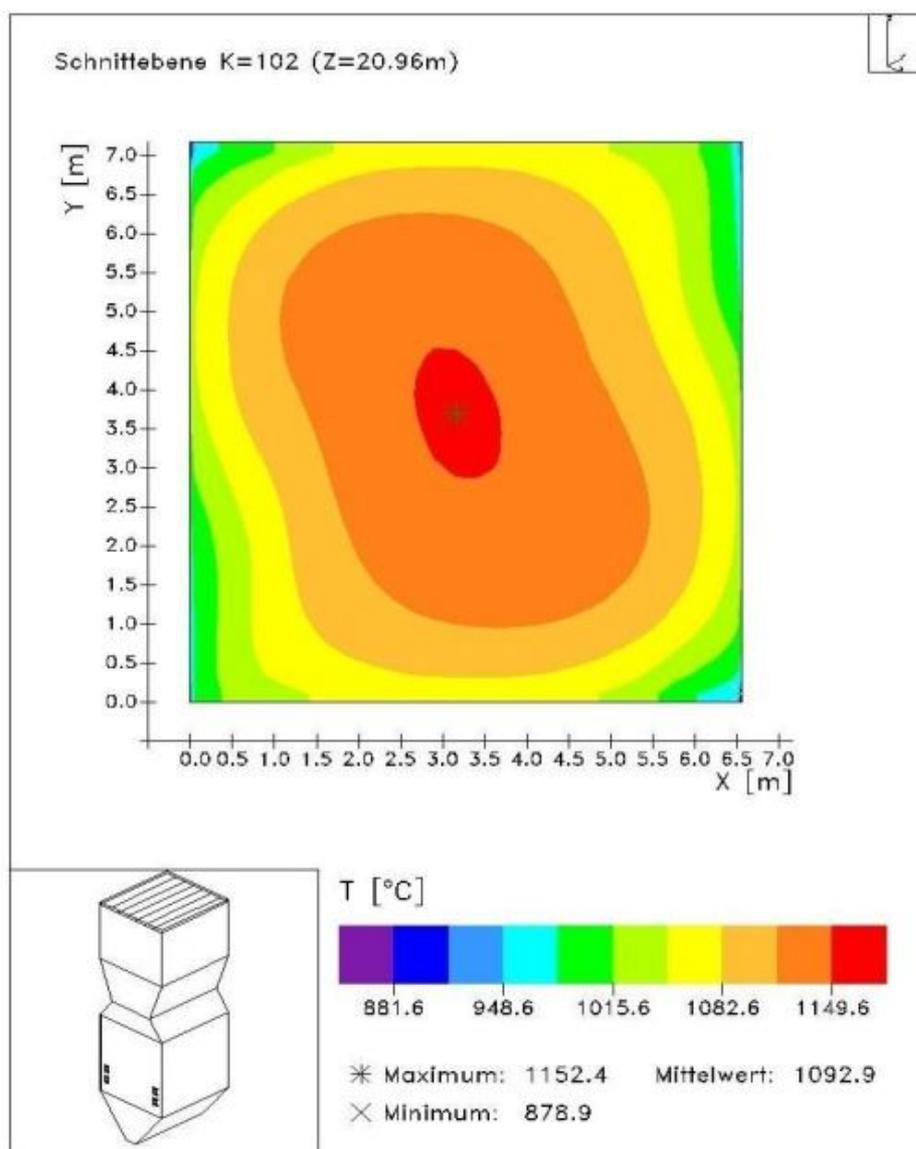
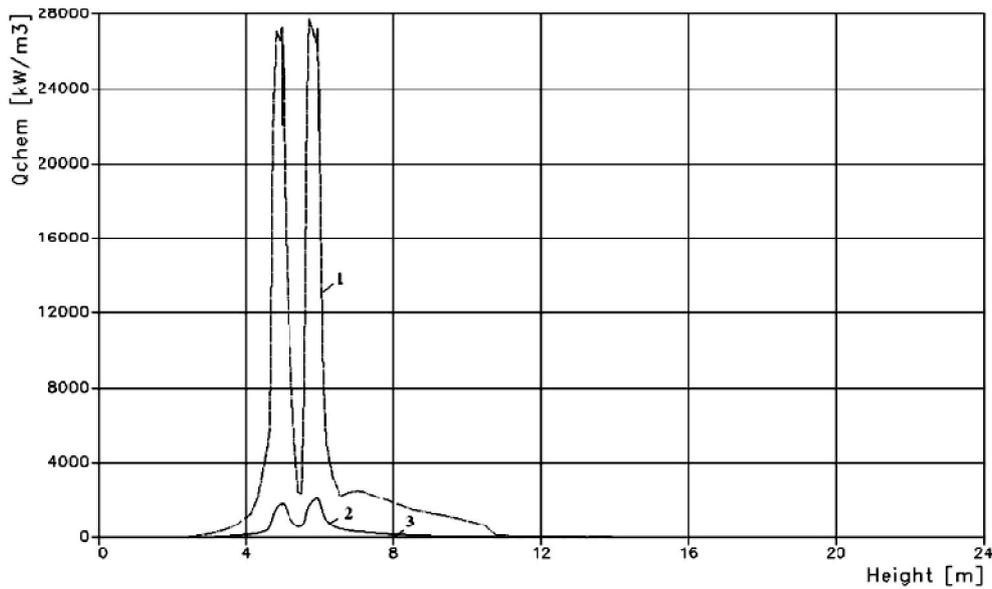


Рисунок 3 – Распределение температуры T на выходе из камеры сгорания

На рисунках 4-6 представлено распределение энергии, выделяемой или поглощаемой вследствие протекания в топочной камере химических реакций между компонентами угля и воздуха. Как и следовало ожидать, максимальная интенсивность химических реакций, наблюдается в центральной части камеры сгорания, а именно в зоне расположения горелок. Тепловая энергия, которая высвобождается за счет химических реакций окисления углерода и водорода до их оксидов, приводит к тому, что в этой области, где имеется наибольшая концентрация углерода, водорода и кислорода, мы наблюдаем максимумы химической энергии Q_{chem} рисунок 4-5.



1 - максимальные; 2 - средние; 3 – минимальные в поперечном сечении камеры сгорания значения Q_{chem}

Рисунок 4 – Распределение химической энергии Q_{chem} по высоте камеры сгорания

Это связано с тем, что здесь созданы все аэродинамические условия для интенсивного протекания химических реакций между составляющими компонентами топлива и окислителя. А это высокие скорости встречного тангенциального движения реагирующих потоков, высокий уровень турбулентности, обеспечивающие тщательное перемешивание. Сказанное подтверждается графиком распределения химической энергии Q_{chem} , которая выделяется вследствие происходящих химических превращений в пылеугольном факеле и достигает в этой области камеры сгорания максимальных значений (рисунок 4-5).

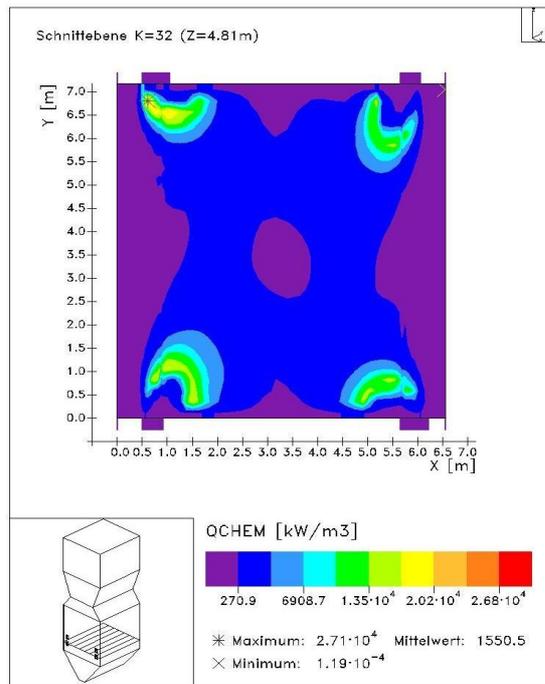


Рисунок 4 – Распределение химической энергии Q_{chem} в поперечном сечении камеры сгорания в зоне горелок нижнего яруса ($h=4.81m$)

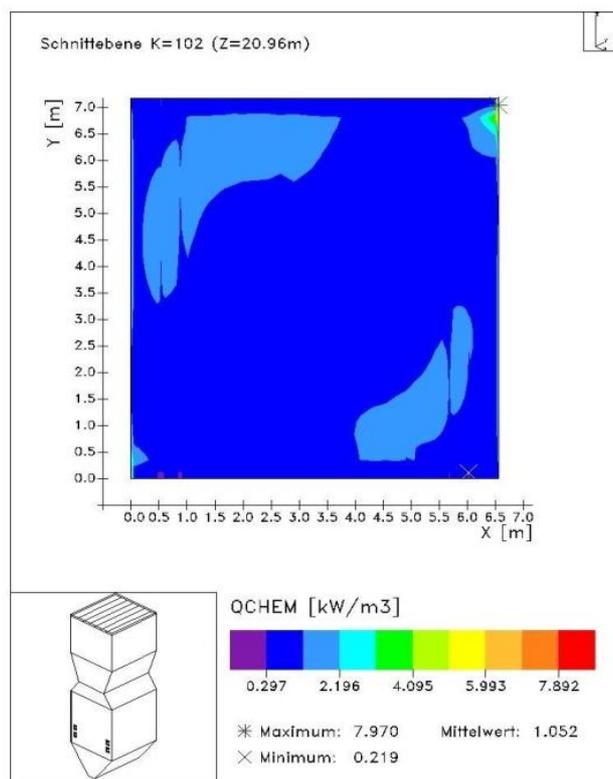


Рисунок 5 – Распределение химической энергии Q_{chem} на выходе из камеры сгорания

На рисунке 4 имеется два максимума значений Q_{chem} , что соответствует двум ярусам горелочных отверстий, через которые подается топливо и окислитель и где концентрации вступающих в химическое взаимодействие веществ максимальна. Каково значение максимальной химической энергии можно оценить по 3-D распределению с помощью цветной шкалы (рисунок 5). Так в зоне расположения горелочных устройств ($k=52$, $h=4.81m$) среднее значение $Q_{chem}=1550.5 \text{ kw/m}^3$, максимальное значение равно $2.71 \cdot 10^4 \text{ kw/m}^3$. Естественно, что при продвижении к выходу из камеры сгорания (рисунок 4-6) энергия, выделяемая за счет процессов химического взаимодействия, уменьшается и на выходе среднее значение $Q_{chem}=1.052 \text{ kw/m}^3$.

Список литературы:

- 1 Patankar S.V. Numerical heat transfer and fluid flow. – New–York: Hemisphere publishing corporation, 1980. – 150 p.
- 2 Устименко Б.П., Алияров Б.К., Абубакиров Е.К. Огневое моделирование пылеугольных топок. – Алма–Ата: Наука, 1982. – С.212.
- 3 Устименко Б.П., Джакупов К.Б., Кроль В.О. Численное моделирование аэродинамики и горения в топочных и технологических устройствах. – Алма–Ата: Наука, 1986. – 224 с.
- 4 Белый В.В., Васильев В.В. и др. Исследование теплообмена в топке котла П–67 // Труды V Минского межд. форума по тепло– и массообмену. – Минск, 2004. – №8–02. – 265-267 с.
- 5 Скассия Ц., Кеннеди А. Расчет двумерных химически реагирующих течений// Ракетная техника и космонавтика. – 1974. – Т.12, №9. – С.130–136.
- 6 Аскарлова А.С., Болегенова С.А., Максимов В.Ю., Бекмухамет А. Применение технологии 3D моделирования при исследовании процессов теплопереноса в

камерах сгорания действующих энергетических объектов//Известия Томского политехнического университета. Энергетика. – 2012. – Т.320. – № 4. 26–32 с.

7 Аскарлова, А.С. Тепломассоперенос при сжигании твердого топлива в промышленных котлах на примере Павлодарской ТЭЦ //Теплофизика и аэромеханика. – Новосибирск: СО РАН, 2000. - Т.7, №2. – 293-300 с.