

УДК 662.933.1:004.42

## ПРИМЕНЕНИЕ ПАКЕТА FIRE 3D К АНАЛИЗУ ПРОЦЕССОВ ШЛАКОУЛАВЛИВАНИЯ В ПЫЛЕУГОЛЬНЫХ ТОПКАХ

А.В. Старченко\*, А.С. Заворин, С.В. Красильников\*\*,

\*Томский государственный университет, г. Томск

E-mail: [starch@ctc.tsu.ru](mailto:starch@ctc.tsu.ru)

\*\*Томский политехнический университет, г. Томск

E-mail: [sergey@ped.tpu.ru](mailto:sergey@ped.tpu.ru),

### Введение

Комплекс программ FIRE 3D может рассчитать коэффициент шлакоулавливания и возможные зоны шлакования конвективных поверхностей благодаря принятой модели осаждения частиц на стенки котлоагрегата, что несет элемент новизны в области численного моделирования. Применение данного программного обеспечения ускоряет процесс разработки, наладки и реконструкции топочных устройств и котлоагрегатов. Можно наглядно оценить до монтажа, пуско-наладочных работ и ввода в эксплуатацию оборудования или принятых изменений в конструктивных особенностях оборудования степень соответствия характеристик ожидаемым при проектировании. Например, можно посмотреть уровень температур, давления, турбулентных пульсаций, степень осаждения частиц на стенки, выгорание реагирующих компонентов аэросмеси до проведения испытаний на натуральных образцах. На основе проведенных вычислений гораздо проще произвести оценку необходимых изменений в конструкции для улучшения этих характеристик. Это дает реальную экономию средств при проверке функциональности спроектированного оборудования, а также при оценке экологичности выбросов отработанных газов в атмосферу.

### *Математическая модель пространственного запыленного турбулентного потока в камере сгорания с учетом осаждения частиц*

1) Уравнения изменения массы газовой смеси

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial x_i} = 0,$$

где  $\rho$  - плотность газовой смеси;  $U_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) – компоненты скорости газа;  $x_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) - декартовы координаты; по повторяющимся индексам производится суммирование от 1 до 3.

2). Уравнения количества движения для газовой фазы,

$$\frac{\partial \rho U_i U_j}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (\mu + \mu_T) \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left[ \rho k + (\mu + \mu_T) \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right] \right] +$$

$$+ \rho g_j + F_j; \quad j = 1, 2, 3,$$

где  $p$  - давление;  $\mu_T$  - турбулентная вязкость;  $\mu$  - молекулярная вязкость;  $k$  - энергия турбулентности;  $\delta_{ij}$  - символы Кронеккера ( $\delta_{ii} = 1$ ;  $\delta_{ij} = 0 (i \neq j)$ );  $g_j$  - проекции ускорения свободного падения на декартовы оси;  $F_j$  - компоненты силы межфазного взаимодействия между частицами и несущей средой.

### 3). Модель турбулентности

При моделировании турбулентной структуры потока используется « $k$ - $\varepsilon$ » модель турбулентности, учитывающая наличие в потоке дисперсных частиц [1].

$$\frac{\partial \rho U_i k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \left[ \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right] \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - \rho \varepsilon - S_k,$$

$$\frac{\partial \rho U_i \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \left[ \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right] \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{\varepsilon 1} G_k \frac{\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 2} \frac{\rho \varepsilon^2}{k} - C_{\varepsilon 3} S_k \frac{\varepsilon}{k},$$

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}.$$

Здесь  $G_k = \left[ \mu_T \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho k \right] \frac{\partial U_i}{\partial x_j}$ ;  $S_k$  - дополнительная диссипация турбулентной энергии, обусловленная влиянием дисперсной фазы;  $\sigma_k = 1,0$ ;  $\sigma_\varepsilon = 1,3$ ;  $C_{\varepsilon 1} = 1,44$ ;  $C_{\varepsilon 2} = 1,92$ ;  $C_{\varepsilon 3} = 1,83$ ;  $C_\mu = 0,09$ .

### 4). Представление движения полидисперсных частиц в топке

Для моделирования движения частиц используется лагранжев подход [2,3,4], суть которого заключается в следующем. Весь спектр частиц пылеугольного топлива, поступающего в топочную камеру, разбивается на  $N$  групп. Разбиение осуществляется по размерам на основе зависимости Розина – Раммлера [5,6,7] или вручную на основе данных экспериментального анализа фракций после обработки угля мельницами. При этом считается, что поведение каждой группы частиц может быть охарактеризовано поведением ее представителя – пробной одиночной частицы. Т. е. свойства, которыми в настоящий момент времени обладает частица-маркер, распространяются на все частицы группы, которую представляет частица-маркер. Для расчета параметров, характеризующих состояние частицы-маркера, используется следующая система обыкновенных дифференциальных уравнений:

Уравнения движения частицы-маркера  $i$  – ой группы,

$$\frac{d\tilde{U}_j^i}{dt} = \frac{\tilde{U}_j - \tilde{U}_j^i}{\tau_i} + g_j; j = 1, 2, 3,$$

$$\tau_i = \frac{4\rho_p d_{pi}}{3c_{D_i} \rho |\tilde{U}^i - \tilde{U}|}; c_{D_i} = \begin{cases} \frac{24}{\text{Re}_i} (1 + 0,15 \text{Re}_i^{0,687}), & \text{Re}_i \leq 1000; \\ 0,44; & \text{Re}_i > 1000; \end{cases}$$

$$\text{Re}_i = \frac{\rho \sqrt{\sum_{j=1}^3 (\tilde{U}_j^i - \tilde{U}_j)^2} d_{pi}}{\mu}$$

где  $\tilde{U}_j^i$  - компоненты скорости частиц;  $\tilde{U}_j = U_j + U_j'$  - компоненты скорости газа;  $\rho_p$  - плотность угля;  $d_{pi}$  - размер частиц  $i$ -ой группы;  $c_{D_i}$  - коэффициент сопротивления частиц;  $\tau_i$  - время их релаксации; турбулентные пульсации скорости газа  $U_j'$  выбираются случайным образом на основе принятого нормализованного распределения Гаусса со

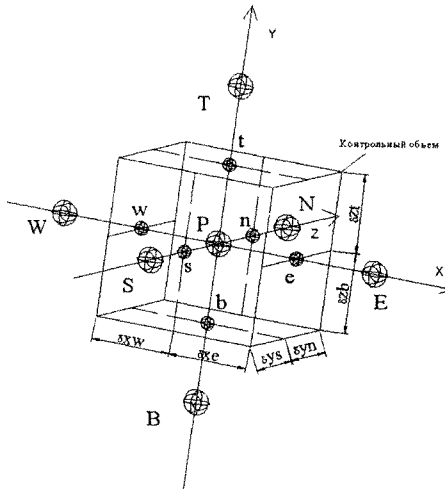


Рис.1. Контрольный объем

среднеквадратичным отклонением, равным  $\frac{2}{3}k$ , т.е.  $U_j' = \xi_j \sqrt{\frac{2}{3}k}$ ,  $|\xi_j^2| = 1$ ;  $k$  - энергия турбулентности. Значение  $\xi_j$  изменяется с помощью датчика случайных чисел в процессе движения частицы в исследуемом пространстве

через отрезок времени  $\tau_T = \min \left[ \frac{L}{\sqrt{\frac{2}{3}k}}, \frac{L}{|\tilde{U}^i - \tilde{U}|} \right]$ , где

$L = \frac{k^{3/2}}{\varepsilon}$  - масштаб турбулентности.

Компоненты скорости частиц, не отмеченные волной ( $U_j'$ ), являются средними скоростями, осредненными турбулентными пульсациями. Эти и другие параметры полета частиц-маркеров усредняются после получения достаточного количества траекторий из одной точки.

#### 5). Учет влияния дисперсной фазы на несущую

В описанной выше математической модели необходимо определить члены в уравнениях переноса, которые описывают влияние частиц на характеристики несущей среды  $F_j$ . В использованном здесь смешанном эйлерово-лагранжевом способе моделирования аэродинамики в камере сгорания котлоагрегата учет обратного влияния частиц на газовую фазу выполняется следующим образом.

Поскольку решение уравнений будет осуществляться численно, то рекомендуется использовать метод контрольного объема. Согласно этому методу, область исследования разбивается на конечное число непересекающихся объемов. Значения искомых функций внутри каждого объема могут считаться однородными. При последовательном расчете траекторий движения частиц-представителей каждой группы с учетом изменения их массы, скорости, положения и температуры для каждого контрольного объема вычисляются значения  $F_j$  по следующей формуле:

$$F_j = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \left[ \frac{U_j^i - U_j}{\tau_i} \dot{m}_i t_i - \frac{\Delta m_i}{m_{oi}} \dot{m}_{oi} U_j^i \right]; j = 1, 2, 3,$$

Здесь  $N$  - число частиц-представителей, прошедших через рассматриваемый контрольный объем, имеющий размер  $V$ ;  $\Delta m_i$  - изменение массы  $i$ -ой частицы за время прохождения ею данного контрольного объема;  $m_{oi}$  - начальная масса частицы представителя;  $\dot{m}_{oi}$  и  $\dot{m}_i$  - начальный и текущий массовые расходы частиц данной фракции;  $t_i$  - время прохода  $i$ -

ой частицы через контрольный объем  $V$ ;  $\bar{m}_i$  - средняя масса  $i$ -ой частицы в контрольном объеме  $V$ .

### Численный метод расчета двухфазных турбулентных потоков в областях сложной геометрии

Система дифференциальных уравнений для аэродинамических течений газовой фазы решалась методом контрольного объема SIMPLE [8]. Для получения дискретного аналога используем семиточечный шаблон, показанный на рис.1.

Узловые точки расположены в центре контрольных объемов. При этом способе сначала наносятся грани контрольных объемов, а затем в центр каждого из контрольных объемов ставится узловая точка. При неодинаковых размерах контрольных объемов грани располагаются неравномерно относительно узловых точек.

При расположенной в шахматном порядке сетке составляющие скорости рассчитываются для точек, лежащих на гранях контрольных объемов. Таким образом, составляющая скорости  $U$  вдоль оси  $X$  рассчитывается на гранях, перпендикулярных направлению оси  $X$ . Точки, в которых определяется  $U$ , показаны на рис.1 маленькими сферами, а узловые точки (назовем их основными) изображены большими сферами. Кубом обозначен сам контрольный объем. Следует отметить, что по отношению к узловым точкам основной сетки точки, в которых определяется  $U$ , смещены только в направлении оси  $X$ . Другими словами, эти точки лежат на отрезках, соединяющих две соседние (вдоль оси  $X$ ) основные узловые точки. Находится ли точка, где определяется  $U$ , точно посередине между основными узловыми точками, зависит от того, как выделены контрольные объемы. Узловая точка для  $U$  должна лежать на грани контрольного объема независимо от того, находится ли последняя посередине между узловыми точками или нет. Таким же образом определяются узловые точки для составляющих  $V$  и  $W$ .

Таким образом, для трехмерной задачи (с  $T$  и  $B$ , представляющими верхнюю и нижнюю грани в направлении оси  $z$ ) аналог можно представить [8]:

$$a_P \Phi_P = a_E \Phi_E + a_W \Phi_W + a_N \Phi_N + a_S \Phi_S + a_T \Phi_T + a_B \Phi_B + b.$$

### Тестирование численной модели в изотермических условиях

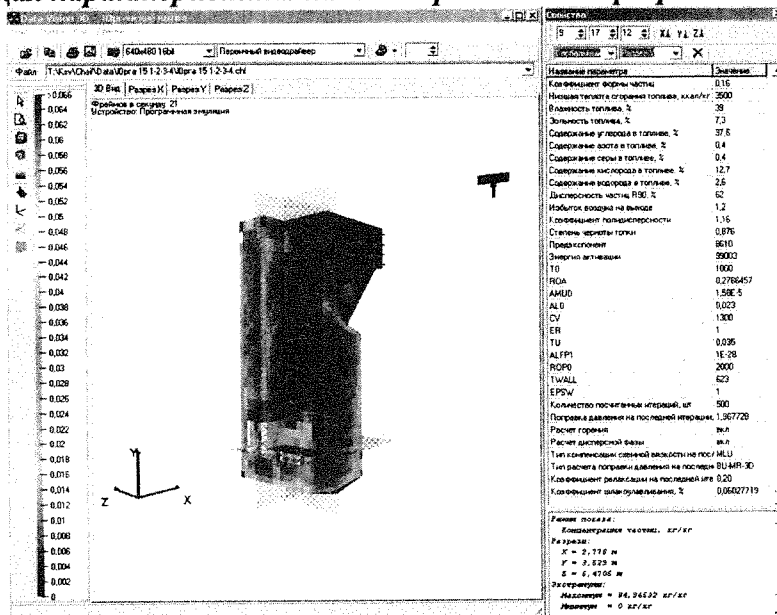


Рис.2 Изолинии модуля вектора скорости в горизонтальном сечении топки, проходящем через середину горелок.  
 а) - расчет на основе схемы MLU.  
 б) - схемы Патанкара.  
 в) - схемы QUICK Леонарда.

На рис.2 [9] представлены изолинии модуля вектора скорости в горизонтальном сечении топки, проходящем через середину горелок, расположенных на левой стенке. Скорость вдува составляла 36,9 м/с, шаг изолиний - 4 м/с. Сопоставляя полученные результаты, следует заметить, что более предпочтительным является использование схем более высокого порядка аппроксимации конвективных членов. Применение схемы QUICK позволяет получить наиболее

контрастную картину течения с фиксацией мелких аэродинамических деталей. Например, таких как снижение скорости менее 4 м/с на расстоянии 2-3 м напротив крайних горелок или образование застойных областей на левой стенке между горелками. В принципе, схема Патанкара также указывает на существование этих особенностей, но полученные на ее основе динамические поля более сглажены из-за влияния искусственной схемной диффузии. Особенно это касается струй из крайних горелок, смешение которых с центральными предсказывается менее интенсивным и на более протяженном участке. Результаты, получаемые с использованием MLU-схемы, весьма близки по качеству воспроизведения картины течения к расчетным данным схемы QUICK. Что касается временных затрат ресурсов ЭВМ на получение установившегося решения, то выбор схемы аппроксимации конвективных членов в уравнениях движения не играл особой роли при сходимости глобального итерационного цикла.

### Общая характеристика пакета прикладных программ Fire 3D



В течение нескольких лет в ТПУ проводится работа по переводу созданного в среде DOS для расчета пространственных аэротермохимических топочных процессов пакета CHAIF [10] под новую операционную систему с дальнейшим развитием математического обеспечения. Разработанный программный комплекс [11] получил название Fire 3D и состоит из четырех приложений для стадийной обработки данных: Mesh Converter – для импорта расчетных сеток трехмерных геометрий из текстового формата, Flow Searcher – для расчета турбулентных течений и теплообмена с возможностью применения лагранжева подхода для описания горения и движения частиц угля с точки зрения оценки шлакоулавливания, Data Vision – для визуализации конечного результата вычислений и Report Converter для конвертации и последующего анализа в Excel результатов прохождения расчетов.

### Литература:

1. Pourahmadi F., Humpherey J.A.C. Modeling solid-fluid turbulent flows with application to predicting erosive wear // Physic-Chemical Hydrodynamics, 1983, Vol. 4, N. 3.

2. Дектярев А.А., Камешиков Л.П., Ковалевский А.М., Программа AEROCHEM для моделирования трехмерных турбулентных реагирующих течений излучающего газа при наличии распыленных частиц //Вычислительные технологии, 1994, Т.4, №12.
3. Etami M.D., Lazopoulos G., Lockwood F.C. The computation of heat transfer in engineering combustion equipment //Proc. of the 37 EURO THERM Seminar. Sallugia: ENEA. 1994.
4. Распространение запыленных струйных течений. Теоретическое и экспериментальное исследование./ А.А. Мостафа, Х.Ц. Монджиа, В.Г. Макдонелл, Г.С. Самуэльсен // Аэрокосмическая техника, 1990, №3.
5. Виленский Т.В., Хзмалян Д.М. Динамика горения пылевидного топлива. - М.: Энергия, 1978.
6. Горение твердого топлива: Материалы IV Всесоюзной конференции. - Новосибирск, Наука, 1974.
7. Блох А.Г. Теплообмен в топках паровых котлов. - Л.: Энергоатомиздат, 1984.
8. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. - М.: Энергоатомиздат, 1984.
9. Старченко А.В., Есаулов А.О., Красильников С.В. К расчету турбулентных течений в топочных камерах // Вычислительная газодинамика и горение конденсированных систем: Сб. науч. тр. / под ред. С.С. Бондарчука, В.М. Зеличенко. – Томск: Изд-во Том. гос. пед. университета, 2001.
10. Бубенчиков А.М., Старченко А.В. Пакет прикладных программ SNAIF для численного исследования аэродинамики и теплообмена внутренних течений. – Томск: Изд-во ТГУ, 1991.
11. Красильников С.В., Заворин А.С., Старченко А.В. Программный комплекс для расчета и визуализации трехмерных реагирующих турбулентных течений в топках котлов // Проблемы использования канско-ачинских углей на электростанциях: Сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции. – Красноярск: СибВТИ, 2000.

УДК 621.184.3

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СТАЛИ ТРУБ ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЯ

Л.Л. Любимова, А.С. Заворин, А.А. Макеев, А.М. Казанов  
Томский политехнический университет, г. Томск  
E-mail: [aleks@ped.tpu.ru](mailto:aleks@ped.tpu.ru)

Исследование структурной устойчивости стали труб пароперегревателя вызывает интерес, прежде всего в связи с часто наблюдаемыми явлениями хрупкого коррозионного растрескивания под напряжением (КРН) пластичных сталей и сплавов, применяемых в котло-и реакторостроении.

Анализ трубных дефектов показывает, что по причинам КРН выходят из строя до 31% парогенераторных трубок уже в течение первых 12-14 месяцев эксплуатации [1].