УДК 532.5:536.24

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕПЛООБМЕНА В ТОПОЧНОЙ КАМЕРЕ ПРИ СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРАХ РАБОЧЕГО ТЕЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ANSYS FLUENT

Балакин В.В., Булычев Д.А., Дергунов И.М., Кузнецов А.В., Хохлов А.В.

ОАО «ЭМАльянс», Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Разработана методика расчета топочного процесса пылеугольных котлов, работающих на сверхкритических параметрах пара, с учетом сопряженного теплообмена в топочных экранах. Расчет топочного процесса основан на решении уравнений Навье-Стокса для турбулентного течения химически реагирующего газа в сочетании с уравнениями переноса энергии, реагирующих компонент, Лагранжевого представления частиц угля с учетом поверхностных реакций и переноса радиационной энергии. Методика расчета топочных экранов основывается на решении одномерного уравнения движения теплопроводной среды в трубах экранов и аналитическом решении уравнения теплопроводности для стенок труб.

Методика реализована в программном комплексе ANSYS Fluent с возможностью параллельного расчета в режиме распределенных вычислений.

ВВЕДЕНИЕ

Использование технологий трехмерного численного моделирования является важным дополнением к традиционным методам расчета топок пылеугольных и газомазутных энергетических котлов. Эти технологии позволяют рассчитывать как локальные, так и интегральные характеристики топочного процесса. Одним из ключевых моментов при моделировании топочного процесса является расчет теплообмена в топочных экранах.

В традиционной постановке, как в нормативном методе, так и в трехмерном моделировании тепловую эффективность поверхностей теплообмена необходимо задавать, и в то время как балансовые соотношения хорошо выполняются, точность расчета локальных характеристик оказывается недостаточной, что, в свою очередь, требует введения дополнительных моделей. К тому же тепловая эффективность топочных экранов определяется полуэмпирическими методами и не всегда достоверно описывает процесс теплообмена в топках с нетрадиционными схемами сжигания топлива.

За последние 40 лет отечественными [1 , 2] и зарубежными специалистами [4,5,6,7] проведено множество экспериментальных и расчетных исследований гидродинамики и теплообмена жидкостей СКД.

Практическими результатам этих работ являются критериальные соотношения, позволяющие рассчитывать коэффициент трения и число Нуссельта при конвективной теплоотдаче жидкостей при сверхкритических давлениях.

В данной работе приводится одна из возможных реализаций метода расчета сопряженного теплообмена в экранах топочной камеры энергетического котла с учетом локальных параметров теплоносителя, расширяющая стандартные возможности программного комплекса ANSYS Fluent.

© Балакин В.В., Булычев Д.А., Дергунов И.М., Кузнецов А.В., Хохлов А.В.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ РАСЧЕТА ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА В ТОПОЧНОЙ КАМЕРЕ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО КОТЛА

Современные вычислительные средства позволяют рассчитывать топки котлов в достаточно сложной постановке, учитывающей не только процессы горения, но также и процессы сопряженного теплообмена в экранах топочной камеры. Учет теплообмена в экранах топочной камеры позволяет с бóльшей точностью предсказывать локальное распределение температур и тепловых потоков на этих поверхностях и учитывать тепло-гидравлические разверки, что, в свою очередь, способствует повышению точности определения мест возможного шлакования, а также является необходимым этапом для построения моделей образования и эволюции шлаковых отложений.

В общем случае трехмерный расчет топочного процесса с помощью программного комплекса ANSYS Fluent основывается на совместном численном решении уравнений Навье-Стокса, уравнении переноса термохимической энергии, уравнений модели турбулентности, переноса энергии радиацией, набора уравнений переноса дискретной фазы (частиц угля), уравнений переноса реагирующих компонент газовой фазы, уравнений химической кинетики. Данные уравнения представляются в виде дискретных аналогов с помощью разностной сетки по методу конечных объёмов. Такой подход в настоящее время является стандартом де-факто для описания топочных процессов, а его реализация в программе Fluent, в совокупности со вспомогательными средствами, представляется одной из самых совершенных.

Методика расчёта топочного процесса, разработанная в департаменте математического моделирования ОАО «Эмальянс» включает в себя описание следующих физических процессов:

Турбулентное течение вязкой реагирующей газопылевой смеси на основе решения упомянутой выше системы уравнений;

Движение и сгорание частиц угля в этом газе с учетом фракционного состава, обмена энергией, массой и импульсом на основе Лагранжевого представления;

Перенос тепловой энергии радиацией, включая излучение самого газа, взаимодействие частиц угля с излучением;

Механизмы образования вредных выбросов;

Обмен энергией с теплообменными поверхностями топочной камеры.

При создании модели конкретного котла методика позволяет преобразовывать данные по котлу и топливу во входные данные программы. Также производится дополнительная настройка подмоделей химических реакций и механизма выгорания угля с учетом имеющихся экспериментальных данных.

Модель конкретного котла учитывает все особенности подачи газов и топлива в топочную камеру и теплообмена с тепловоспринимающими поверхностями топочной камеры. При необходимости в модель может быть добавлена конвективная шахта.

Для повышения точности расчета локальных температур на стенках топки применяется следующая модель экранов топочной камеры и процедура расчета сопряженного теплообмена.

Рассматривается панель топочного экрана, состоящая из Nтруб с размерами $L \times D \times \delta$, входного и выходного коллекторов. Расход среды (массовая скорость), ее состояние во входном коллекторе и давление в выходном считаются известными. Трубы, образующие экран, соединены проставками. Известны теплофизические свойства материала труб.

В текущей реализации предполагается, что система находится в стационарном состоянии, расход среды в каждой трубе панели одинаков и равен отношению расхода на входе в коллектор к количеству труб.

Учет влияния конвективной теплоотдачи к среде при СКД внутри труб топочных экранов на локальное распределение теплового потока и температуры металла труб по поверхности панелей топочных экранов основан на совместном решении уравнения движения

$$\frac{dG}{dx} = 0 \qquad (1)$$

$$dp = \left(\xi \frac{G^2}{2\rho F^2 D} + \rho g \right) dx \qquad (2)$$

и энергии

$$dh = \frac{q\pi D}{G} dx \qquad (3)$$

Уравнения (1)…(3) записаны для дифференциально малого участка каждой из трубок, включенных в панель.

Замыкание системы осуществляется с помощью решения уравнения теплопроводности для стенки труб, из которого определяется температура внутренней и внешней поверх-

ностей трубы, а также уравнения состояния среды при СКД.

Восприятие тепла осуществляется только поверхностью экрана, обращенной внутрь топочной камеры. Обратная сторона экрана считается адиабатически изолированной. Таким образом, полный тепловой поток, воспринимаемый наружной поверхностью топочного экрана, передается через стенку трубы теплопроводностью и снимается при течении среды при СКД внутри труб.

Расчет конвективной теплоотдачи среды при сверхкритическом давлении осуществляется по формуле Б.С. Петухова

$$Nu = \frac{\xi/8}{1+\frac{900}{\mathrm{Re}_l}+12.7\sqrt{\frac{\xi}{8}\left(\mathrm{Pr}^{2/3}-1\right)}} RePr\varepsilon_\rho\varepsilon_c \qquad (4)$$

Здесь Здесь $\varepsilon_\rho = \left(\frac{\rho_{ст.}}{\rho_{ж}}\right)^{0.3}$ и $\varepsilon_C = \left(\frac{C_{pж}}{C_{pст.}}\right)^{0.5}$ — поправки на изменение свойств по сечению трубы [5].

Формула (4) пригодна для расчетов во всем диапазоне энтальпий среды при сверхкритическом давлении.

Для описания свойств воды в сверхкритическом состоянии используется уравнение состояния реального газа в форме уравнения Гельмгольца, основанное на данных IAPWS и определенное в интервале температур 273.15 К — 1275 К и в интервале давлений 0МПа — 1000 МПа. В общем виде уравнение состояния можно записать как

$$\begin{cases} \rho = \rho(p,h), \\ T = T(p,h). \end{cases} \qquad (5)$$

Для решения системы уравнений (1)…(5) вводится пространственная дискретизация: каждая отдельная труба разбивается на m участков по длине. Для каждого из участков записываются разностные аналоги дифференциальных уравнений.

В результате решения полученной системы алгебраических уравнений находятся распределения давления и энтальпии по длине труб экранной панели, определяется скорость движения и температура среды.

На стенке панели, обращенной в топку, задается граничное условие 3-го рода

$$q = \alpha_{ext}\left(T_{ext} - T_w\right) \qquad (6)$$

Где температура среды T_{ext} и коэффициент теплоотдачи α_{ext} определяются из расчета течения внутри труб экрана.

Верификация разработанной методики оценки теплоотдачи к воде СКД проводилась по данным [7]. Условия расчета принимались следующими: давление 24.5 МПа, температура жидкости на входе 573.15 К (300°С), массовая скорость 1200 кг/(м²•с), тепловая нагрузка 465 кВт/м². Труба ∅14х2 из нержавеющей стали (AISI type 316). На Рис.1 представлено сравнение зависимостей коэффициента теплоотдачи от температуры среды (т.е. фактически по длине трубы), построенных по экспериментальным данным [7] и рассчитанных по данной методике с использованием формулы (4), как поправками на изменение свойств, так и без них.

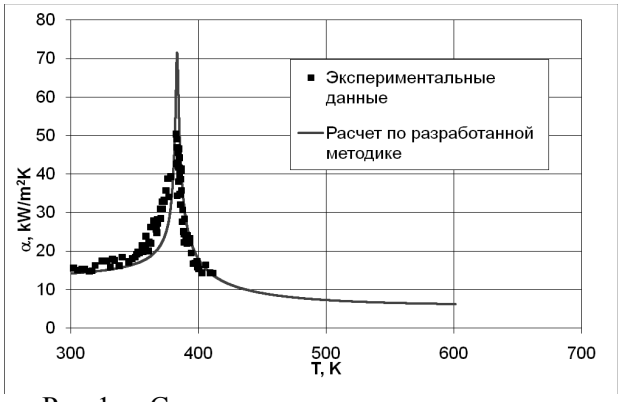

Рис.1 Сравнение расчета теплоотдачи по разработанной методике с данными [7].

Видно, что при температурах бóльших псевдокритической рассчитанный коэффициент теплоотдачи точно совпадает с измеренным экспериментально. В области жидкости (слева от псевдокритической температуры) формула (4) дает несколько заниженный коэффициент теплоотдачи.

Максимальное значение коэффициента теплоотдачи при расчете без поправок равно 75 кВт/(м²•К), а при использовании поправок – 67 кВт/(м²•К). Максимальное значение коэффициента теплоотдачи, измеренное в эксперименте [7] для условий расчета составило 50 кВт/(м²•К) и соответствует псевдокритической температуре при давлении 24.5 МПа.

Рис.1 показывает, что разработанный подход обеспечивает корректный расчет теплоотдачи для течения жидкости в круглой трубе при СКД.

Важная особенность разработанной методики заключается в возможности расчета теплоотдачи к воде сверхкритического давления не только в гладких трубах, но и в трубах с внутренним оребрением в виде трапециевидных канавок, который может быть проведен с использованием формул аналогичных (4).

ПРИМЕР РАСЧЕТА ПЫЛЕУГОЛЬНОГО КОТЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПИСАННОЙ МЕТОДИКИ

Методика расчета реализована в программном комплексе ANSYS Fluent с применением стандартных функций комплекса и так называемых пользовательских функций (UDF), с помощью которых и производится решение задачи о течении воды при СКД в топочных экранах котла. Поскольку для расчетов используется вычислительный кластер, эти функции, так же как и сам программный комплекс, распараллелены с использованием технологии распределенной памяти.

В качестве примера расчета с использованием описанной выше методики рассмотрим расчет котла Пп-2650-25-545/542БТ (П-67) Березовской ГРЭС.

Для проведения моделирования была построена трехмерная модель газового тракта котла (Рис.2), включающая в себя выходные части горелок, форкамеры, топку, горизонтальный газоход и конвективную шахту до экономайзера включительно. Конвективные и полурадиационные поверхности нагрева (ширмы, конвективные пароперегреватели и др.) также были включены в трехмерную модель.

Расчетная сетка состояла из 9.6млн. ячеек. Расчеты проводились на вычислительном кластере производительностью 2 Тфлопс.

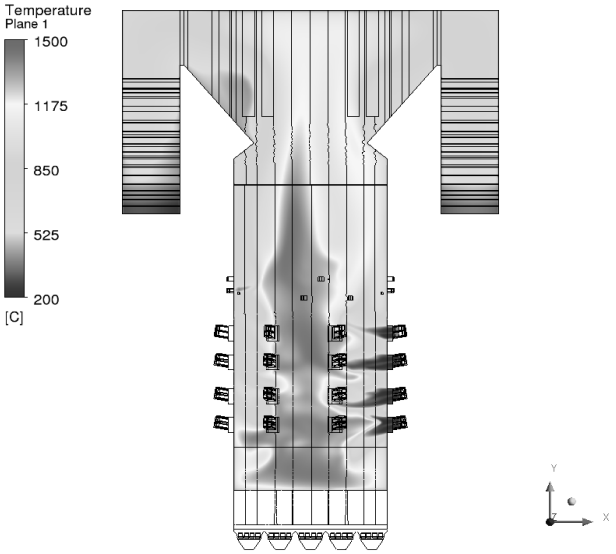

Рис.2 Трехмерная модель котла П-67 и рассчитанная температура в одном из сечений.

Процедура расчета состоит в следующем. Сначала производится расчет топочного процесса котла с использованием граничного условия постоянства температуры среды в топочных экранах, определяемой из теплового расчета. По достижению сходимости расчет останавливается и подключается модуль расчета температуры среды, реализующий описанную методику. На входе в систему топочных экранов задаётся энтальпия среды, а на выходе из топочных экранов – давление. В качестве начального приближения используются данные теплового расчета. Затем расчет продолжается до достижения сходимости по параметрам среды в топочных экранах и далее до установления температуры газов в выходном сечении.

В расчете задавалась система экранов, состоящая из двухпроходной НРЧ и ВРЧ с коллекторами, а также байпаса, соединённых согласно гидравлической схеме котла.

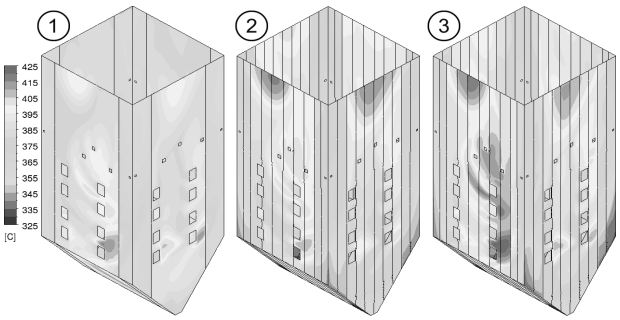

Рис.3 Распределение температуры на поверхности НРЧ: 1) при постоянной температуре и заданном коэффициенте теплоотдачи в трубах экранов, 2) при линейном распределении температуры и заданном коэффициенте теплоотдачи, 3) при рассчитываемой температуре и коэффициенте теплоотдачи.

Для достижения сходимости по температуре среды потребовалось около 10 внешних итераций, далее эта температура и её распределение практически не менялись.

Проведено сравнение расчетов, выполненных с использованием стандартных граничных условий и данной методики. На Рис.3 представлено сравнение температур поверхности топочных экранов НРЧ, рассчитанных при использовании разных способов задания температуры среды и коэффициента теплоотдачи. Из рисунка можно видеть, что при

задании постоянной температуры среды и α=50000 Вт/(м^{2}К) (1), температура внешней стенки каждой панели изменяется в небольших пределах. При задании линейного профиля температуры среды по высоте, того же коэффициента теплоотдачи и дополнительного разбиения поверхности (2) температура изменяется в значительно большей степени. Наконец, при расчете температуры среды и коэффициента теплоотдачи по описываемой методике (3), максимумы температур оказывается существенно выше, а также наблюдается температурная разверка панелей. Более подробно модель котла и результаты расчетов представлены в статье [9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Департаментом математического моделирования ОАО «ЭМАльянс» на основе программного комплекса ANSYS Fluent создана методика расчета пылеугольных котлов, существенно расширяющая стандартные функции этого пакета.

Методика позволяет создавать трехмерные модели пылеугольных котлов с учетом большого количества особенностей работы котла, таких как вариация фракционного состава топлива, особенности сгорания топлив, особенности подачи газов в топку, а также особенности теплообмена. С помощью указанной методики может быть достигнута высокая точность моделирования топочного процесса, включая также и локальные параметры, что недостижимо при использовании нормативной методики. Методика сопряженного расчета локального теплообмена может быть использована для расчета котлов на других типах топлива а также для расчета котлов использующих нетрадиционные схемы сжигания На примере расчета котла П-67 показана важность учета локального теплообмена в ряде задач.

Дальнейшее совершенствование методики будет направлено на увеличение детальности описания пароводяного тракта котла, моделирования разверок внутри панелей, охвата докритической области, моделирование ширм и других элементов до получения полноценной модели котла с сопряженным расчетом теплоносителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Курганов В.А. Теплообмен в трубах при сверхкритических давлениях теплоносителя: некоторые итоги научного исследования// Труды РНКТ-4. М.: Издательство МЭИ, 2006, — Том 1., С.74 — 83.
2. Петухов Б.С., Генин Л.Г., Ковалев С.А. Теплообмен в ядерных энергетических установках. Под ред. Б.С. Петухова учебное пособие для вузов. М.: Атомиздат, 1974 — 408 с.
3. ANSYS Fluent Theory Guide. Release 13.0, 2010.
4. Jensen M.K., Vlakancic A. Technical Note Experimental investigation of turbulent heat transfer and fluid flow in internally finned tubes // Int. Journ. Heat Mass Transfer. 1999. Vol.42. No 7. P.1343 — 1351.
5. Koshizuka S., Takano N., Oka Y. Numerical analysis of deterioration phenomena in heat transfer to supercritical water // Int. Journ. Heat Mass Transfer. 1995. Vol. 38. No 16. P.3077 — 3084.
6. Pei-Xue Jiang, Yu Zhang, Run-Fu Shi Experimental and numerical investigation of convection heat transfer of CO_2 at supercritical pressures in a vertical mini-tube// Intern. Journ. Heat Mass Transfer. 2008. Vol.51. P.3052 — 3056.
7. Yamagata K., Nishikawa K., Hasegawa S., Fujii T., Yoshida S. Forced convective heat transfer to supercritical water flowing in tubes // Int. Journ. Heat Mass Transfer. 1972. Vol.15. No 12. P.2575 — 2594.
8. Zdaniuk G.J., Luck R., Chamra L.M. Linear correlation of heat transfer and friction factor in helically-finned tubes using five simple groups of parameters // Int. Journ. Heat Mass Transfer. 2008. Vol.51. No 13 — 14. P.3548 — 3555.
9. Балакин В.В., Булычев Д.А., Дергунов И.М., Кузнецов А.В., Несиоловский О.В., Хохлов А.В. Расчет теплообмена в топочной камере при сверхкритических параметрах рабочего тела с использованием ANSYS FLUENT на примере котла П-67 Березовской ГРЭС.