

УДК 620.9; 532.529.5

М.В. Алексеев, А.Л. Сорокин, С.А. Шевырёв, А.Н. Гулев

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОДОРОДНО-КИСЛОРОДНОГО ПЕРЕГРЕВА ПАРА В ПРОЦЕССЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПАРОВОЙ ГАЗИФИКАЦИИ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

Применение в энергетическом пароводяном оборудовании высокотемпературных водородно-кислородных перегревателей пара позволило существенно увеличить КПД паровых турбинных установок [1]. Основное достоинство технологии водородно-кислородного нагрева пара – это высокотемпературный перегрев пара ($1000\text{--}1700^{\circ}\text{C}$), смешанный способ теплообмена, большая удельная мощность топочной камеры (более $500 \text{ МВт}/\text{м}^3$), малая материалоемкость (менее 2 кг/МВт). Данные преимущества позволяют использовать данный вид перегревателей пара в химических технологиях, например, для высокотемпературной паровой газификации твердого топлива [2]. Главная задача при проектировании водородно-кислородных перегревателей пара для высокотемпературных паровых газификаторов твердого топлива поиск оптимальных режимных параметров температуры и расхода пара подаваемого в газификатор. Для выполнения данной задачи было проведено экспериментальное исследование и численный эксперимент.

участка 3. Пар подавался в зазор между жаровой трубой и трубой рабочего участка через ввод 8. Расход пара менялся от 10 до 23 л/мин, расход горючей смеси составлял до 5 л/мин, температура горючей смеси 20°C , температура пара 100°C . Температура на выходе из пароперегревателя, внутри реакционной зоны участка газификации и на выходе из участка измерялась термопарами 7. Контроль устойчивости горения горючей смеси на выходе из жаровой трубы производилось с помощью смотрового окна 4.

Достоинствами данного типа конструкции пароперегревателя является простота изготовления и малое гидравлическое сопротивление для потока пара. К недостаткам можно отнести напряженный высокотемпературный режим работы конструкции. Из выше сказанного возникла задача экспериментального исследования температурного профиля потока пара на выходе из пароперегревателя и профиля температуры стенки пароперегревателя при разном диаметре сопла подачи горючей смеси.

Измерение профиля температур по сечению осуществлялось термопарой хромель-алюмель через штуцер, расположенный перед реакционной зоной. Термопара равномерно подавалась в трубу рабочего участка при помощи микрометрического винта. При достижении максимальной температуры для заданных характеристик расхода пара и горючей смеси, происходило смещение от центра трубы рабочего участка к стенке. Измерение температуры стенки осуществлялось хромель-копелевой термопарой. На поверхности трубы рабочего участка через определенное расстояние были сделаны углубления, в которые помещались термопары.

В дополнение к экспериментальным исследованиям было проведено численное моделирование горения стехнometрической смеси водорода и кислорода в потоке пара в стационарной осесимметричной постановке с использованием пакета Fluent. Решалась система уравнений турбулентного течения идеального вязкого газа с учетом химических реакций. Моделирование турбулентности осуществлялось на основе рейнольсовых напряжений RSM (Reynolds Stress Model) [3]. Для учета влияния турбулентности на процесс горения использовалась обобщенная модель диссиляции вихрей EDC (Eddy Dissipation Concept) [4, 5]. В описании кинетики горения применялась схема реакций, предложенная в [6].

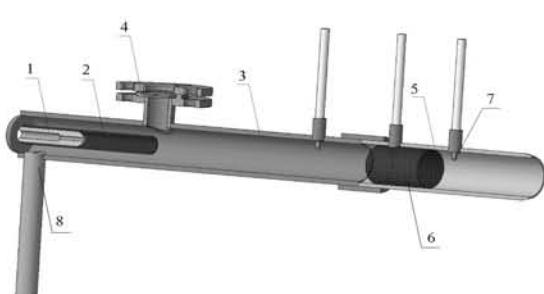


Рис. 1. Конструкция пароперегревателя и участка для газификации твердого топлива
1 – сопло для подачи горючей смеси, 2 – жаровая труба, 3 – труба рабочего участка, 4 – смотровое окно, 5 – участок для газификации, 6 – реакционная зона участка газификации, 7 – термопара, 8 – труба для подвода пара.

На рис. 1 представлена конструкция пароперегревателя и рабочего участка для газификации твердого топлива. Рабочий участок 3 пароперегревателя выполнен из нержавеющей трубы, внутренний диаметр которой 20 мм. Стехнometрическая водородно-кислородная смесь подается через медное сопло 1 диаметром 1,3 мм либо 1,1 мм в жаровую трубу 2 внутренним диаметром 10 мм. Жаровая труба и медное сопло осесимметрично устанавливались внутри рабочего

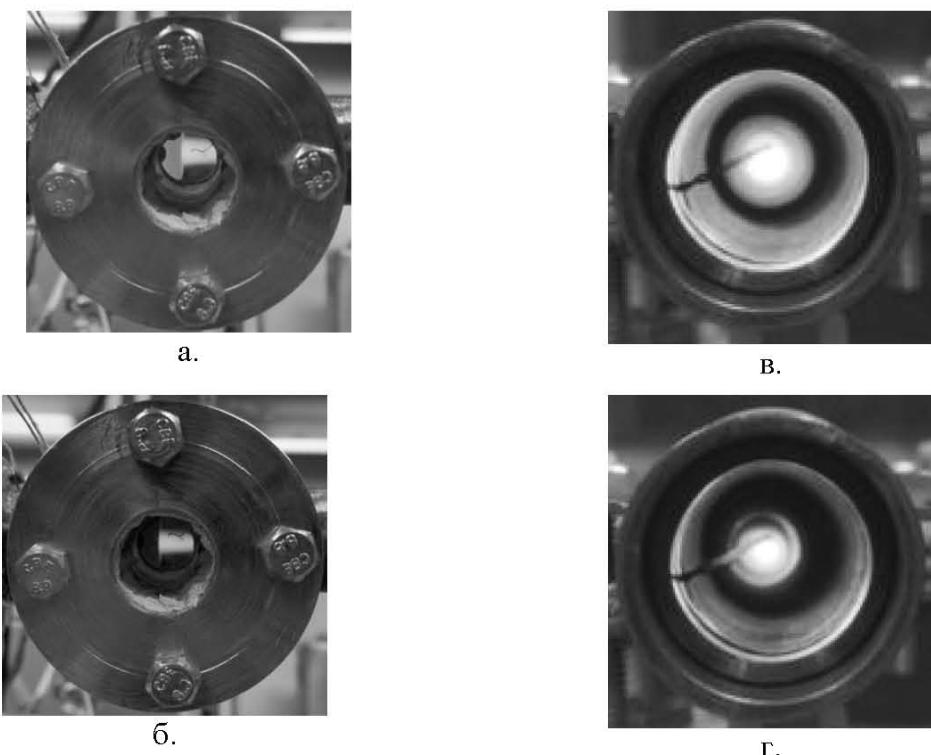


Рис. 2. Фотографии перегревателя пара: а, б - вид на смотровое окно и в, г- вид с торца;
а, в — диаметр сопла 1,3 мм; в, г — диаметр сопла 1,1 мм,
расход пара 12,1 л/мин, расход горючей смеси 3,46 л/мин

Расчеты проводились на сетке, воспроизводящей в осесимметричном приближении геометрию пароперегревателя. Предполагалось, что пар подается через кольцевую щель, расположенную в начале внешней трубы. На границах подачи в зону реакций горючей смеси и водяного пара

задавались равномерные профили всех переменных. На стенах сопла подачи смеси, жаровой трубе и внутренней стенке рабочего участка задавались условия прилипания для скорости течения смеси. Границные условия для энергии турбулентности и диссипации энергии турбулентности ставились с использованием

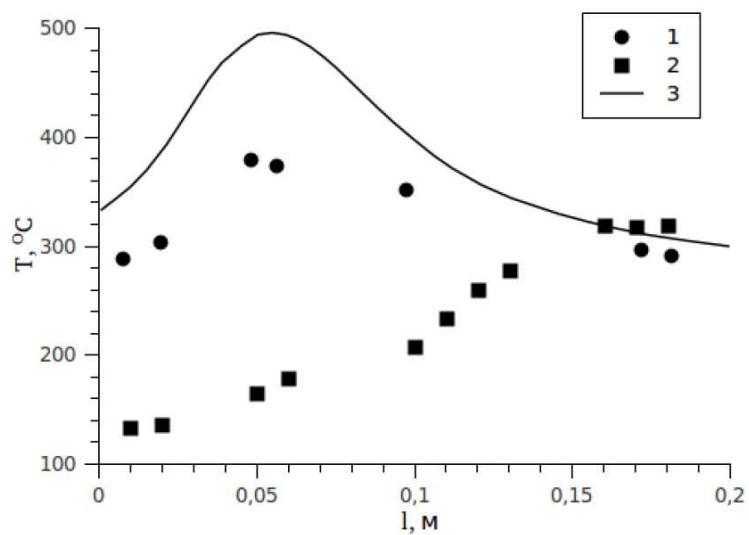


Рис. 3. Профиль осевой температуры стенки пароперегревателя расход пара 12,1 л/мин, расход горючей смеси 3,46 л/мин, 1 – эксперимент, диаметр сопла 1,3 мм, 2 – эксперимент, диаметр сопла 1,1 мм, 3 – численное моделирование, диаметр сопла 1,3 мм.

«функций стенки», в выходном сечении задавалось давление. Учитывался кондуктивный перенос тепла в стенках сопла жаровой и внешней трубы. На внешней стенке трубы учитывался теплообмен с внешней средой в сопряженной постановке: внутри стенки рассчитывался теплоперенос, на внешней стороне ставилось условие радиационно-конвективного теплообмена. Коэффициент конвективного теплообмена с внешней средой принимался равным $5,6 \text{ Вт}/\text{м}^2\cdot\text{К}$, температура внешней среды 288 К. Излучательная способность стенки и внешней среды полагались равными 1, т.е. стенка и среда рассматривались в приближении черного тела.

На рис. 2 представлены фотографии перегревателя пара с видом на смотровое окно – (а, б) и видом с торца – (в, г) при режиме горения с разным диаметром сопла, но при одинаковых расходах пара и горючей смеси. Как можно заметить при режиме горения с диаметром сопла 1,3 мм жаровая труба накаляется до красного состояния (рис. 2.а). На фотографии с торца (рис. 2.в) видно, что пламя занимает полностью жаровую трубу, что и приводит к её разогреву до красного состояния. При этом излучение от жаровой трубы распространяется в зазоре между жаровой трубой и основной трубой пароперегревателя. На рис. 2.б, 2.г представлен режим горения с диаметром сопла 1,1 мм. На фото 2.б видно, что жаровая труба слабо накалена. Если рассмотреть данный режим работы перегревателя с торца (рис. 2.г), то можно заметить, что пламя находится внутри жаровой трубы и не касается стенок. Так же отсутствует излучение от жаровой трубы в зазоре между жаровой трубой и основной трубой пароперегревателя.

На рис. 3 представлен осевой профиль температуры стенки пароперегревателя при диаметрах сопла 1,3 мм и 1,1 мм. Можно заметить, что осевой профиль температуры для диаметра 1,3 мм имеет пик на уровне 370°C при осевой координате 50 мм. Далее температура стенки падает до 280°C. Осевой профиль температуры при диаметре 1,1 мм не имеет пика температуры. Температура возрастает с увеличением координаты от 130°C до 300°C.

Для сравнения на графике представлено численное моделирование осевого профиля температуры для режима работы пароперегревателя с соплом 1,3 мм. Как можно заметить результаты расчета показывают качественное совпадение с экспериментальными данными.

На рис. 4 представлен результат эксперимента и численного моделирования профиля

температуры пара на выходе из пароперегревателя при диаметре сопла 1,3 мм. Можно заметить, что экспериментальные значения температуры пара уменьшаются с значения 930°C на оси до 590°C около радиуса трубы. Линией 2 показан расчет профиля температуры пара на выходе.

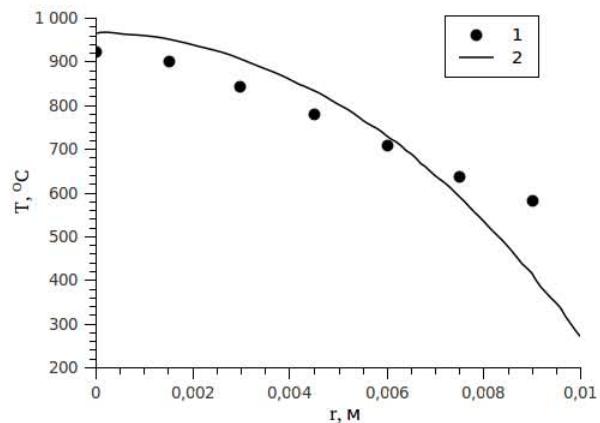


Рис. 4. Профиль температуры пара на выходе из пароперегревателя. Диаметр сопла 1,3 мм, расход пара 12,1 л/мин, расход горючей смеси 3,46 л/мин, 1 – эксперимент
2 – численное моделирование

В работе зафиксировано существенное изменение в режиме работы пароперегревателя при изменении диаметра сопла с 1,3 мм на 1,1 мм при одинаковых расходах пара и горючей смеси. Показано, что горение горючей смеси для сопла 1,1 мм локализовано на оси и не приводит к значительному нагреву жаровой трубы. При горении горючей смеси для сопла 1,3 мм пламя заполняет всю жаровую трубу, что приводит к ее заметному нагреву.

Выявлено, что осевой профиль температуры стенки также зависит от режима горения горючей смеси. Для сопла с диаметром 1,3 мм осевой профиль температуры имеет локализованный пик температуры лежащий в районе раскаленной жаровой трубы. Для режима горения с соплом диаметром 1,1 мм в осевом профиле температуры стенки пик отсутствует. Проведено численное моделирование для режима с соплом 1,3 мм, результаты расчета показывают качественное совпадение с экспериментальными данными.

В работе получен профиль температуры пара на выходе из пароперегревателя для режима работы с соплом 1,3 мм; результаты численного моделирования удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

Работа выполнена при финансовой поддержке ГК № 14.740.11.0101.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Мильман, О. О. Техофизические проблемы создания комбинированных электрогенерирующих

установок с турбинными энергоблоками / О.О. Мильман, Н.А. Прибатурина, В.А. Федоров // Труды 4 РНКТ, Москва. – Изд-во МЭИ, 2006, Т. 1. – С. 258-262.

2. Прибатурина, Н. А. Конверсия углеродсодержащих материалов в среде высокотемпературного водяного пара / Н.А. Прибатурина, А.Р. Богомолов, М.В. Алексеев, С.А. Шевырёв // Вестник КузГТУ. – 2010, № 4. – С. 89-93.

3. B. E. Launder, G. J. Reece, and W. Rodi. Progress in the Development of a Reynolds-Stress Turbulence Closure. J. Fluid Mech., 68(3):537-566, April 1975

4. B. F. Magnussen. On the Structure of Turbulence and a Generalized Eddy Dissipation Concept for Chemical Reaction in Turbulent Flow. Nineteenth AIAA Meeting, St. Louis, 1981.

5. I. R. Gran and B. F. Magnussen. A numerical study of a bluff-body stabilized diffusion flame. Part 2. Influence of combustion modeling and finite-rate chemistry. Combustion Science and Technology, 119:191, 1996.

6. Волчков Э.П., Дворников Н.А., Перепечко Л.Н. Математическое моделирование турбулентного горения водорода в пограничном слое// Инж.-физ. журн. 1998. Т.71, №1. С.86-91

□ Авторы статьи:

Алексеев

Максим Валерьевич,
канд. физ.-мат. наук,
научн. сотр. (Институт
теплофизики им. С.С.
Кутателадзе СО РАН)
E-mail: alekseev@itp.nsc.ru

Сорокин

Анатолий Львович,
научн. Сотр. (Институт
теплофизики им. С.С.
Кутателадзе СО РАН).
E-mail: als@itp.nsc.ru

Шевырёв

Сергей Александрович,
аспирант КузГТУ.
E-mail:
ssa.pmahp@kuzstu.ru

Гулев

Александр Николаевич,
ведущий инженер
(КузГТУ).
Теле.+7-904-375-8993