

УДК 662.76

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И СРАВНЕНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ РАБОТЫ ПИЛОТНЫХ ПОТОЧНЫХ ГАЗИФИКАТОРОВ

THE NUMERICAL RESEARCH AND AERODYNAMIC CHARACTERISTICS COMPARISON OF THE PILOT FLOW GASIFIERS

Ральников Павел Андреевич, магистрант каф. «Тепловые электрические станции», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: ral-pavel@mail.ru, Тел.: +7(909)727-94-26

Абаимов Николай Анатольевич, ассистент каф. «Тепловые электрические станции», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19.

Рыжков Александр Филиппович, доктор техн. наук, профессор каф. «Тепловые электрические станции», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19.

Pavel A.Ralnikov, Master student, Department «Thermal power plants», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: ral-pavel@mail.ru. Ph.: +7(909)727-94-29.

Nikolai A.Abaimov, Assistant, Department «Thermal power plants», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia.

Aleksandr Ph.Ryzhkov, Doctor of Engineering Sc., Prof., Department «Thermal power plants», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia.

Аннотация: В работе рассмотрена одна из технологий энерго- и ресурсосбережения в угольной энергетике, а именно поточная газификация твёрдого топлива в газификаторе - ключевом элементе парогазовой установки с внутрицикловой газификацией. В докладе сравниваются аэродинамические особенности работы двух пилотных одноступенчатых кислородных газификаторов под давлением с сухой топливopодачей пылевидного твёрдого топлива. Одна из этих установок разработана концерном Siemens, а вторая НПО ЦКТИ. Численное моделирование работы агрегатов проведено с использованием метода вычислительной гидродинамики CFD. Для сокращения времени расчёта геометрия исследуемых газификаторов была упрощена до сегментов в 5 и 45 градусов, соответственно. Произведено исследование расчетной сетки для газификатора Siemens. Сравнение расчётных результатов показало влияние относительных длин камер газификации на расположения аэродинамических структур.

Abstract: One of the energy technologies and resource saving in coal-based energy considered in this work. Namely, flow gasifier, as a key element of combined-cycle plants with nutriciology gasification. In the report the aerodynamic features of the two pilot single-stage pressurized oxygen-blown dry-feed pulverized solid fuels gasifier are compared. One of these units developed by concern Siemens, and the second - NPO SKTI. Numerical modeling of the units carried out using computational fluid dynamics (CFD) method. Simplified segments gasifiers geometries of 5 and 45 degrees, respectively, are studied to reduce the calculation time. The study was conducted of the computational grid for the Siemens gasifier. Comparison of the calculated results showed the influence of the gasification chamber relative lengths on the aerodynamic structures location.

Ключевые слова: газификация; вычислительная гидродинамика; твёрдое топливо; кислородное дутьё; поточный газификатор.

Keywords: gasification; CFD; solid fuel; oxygen-blowing; entrained-flow gasifier.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее перспективных энергетических схем является парогазовая установка с внутрицикловой газификацией (ПГУ-

ВЦГ) угля. Использование установок данного типа позволяет снижать вредные выбросы до околонулевых значений, а так же повышать КПД электростанции до 50-55%. Наиболее важный узел

данной установки – поточный газификатор, в котором происходит конверсия пылеугольной смеси в горючий синтез-газ.

Ввиду того, что газификационная установка имеет достаточно сложную конструкцию, а процессы происходят при высоких значениях давления (до 3 МПа) и температуры (до 2000°C), точное инструментальное исследование при таких параметрах выполнить практически невозможно. Именно поэтому в течение последних нескольких десятилетий физические экспериментальные исследования активно подкрепляются математическими методами моделирования, из которых наиболее функциональным считается метод вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics) – CFD.

Многие крупные энергомашиностроительные компании обладают собственными наработками в области поточной газификации. Одним из мировых лидеров в этом сегменте является корпорация Siemens, разработавшая в пилотном и коммерческом вариантах поточный одностадийный кислородный газификатор под давлением с сухой топливopодачей [1]. Исследованием аналогичного газификатора занимаются отечественные энергетики из НПО ЦКТИ на примере собственной пилотной установки [2]. Для сравнения и использования экспериментальных данных, получаемых на вышеперечисленных пилотных газификаторах, следует чётко понимать различия в их работе.

Цель работы – сравнение аэродинамических особенностей движения газа в пилотных одноступенчатых поточных газификаторах под давлением с сухой топливopодачей с использованием CFD метода.

Для достижения цели необходимо решить ряд задач:

- 1) создать CFD модель, включающую в себя все необходимые подмодели;
- 2) провести исследование расчетной сетки на примере зарубежной установки.
- 3) проанализировать работу экспериментальных установок на основе полученных расчётных данных;
- 4) сравнить аэродинамические особенности исследуемых газификаторов.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСТАНОВОК ГАЗИФИКАТОР SIEMENS

Газификатор представляет собой вертикально расположенный сосуд диаметром 0.6 м и высотой 2.8 м, общим объемом 0.273 м³ (рис. 1). В верхней половине установки расположена камера газификации, а в нижней – камера охлаждения. На

выходе из камеры газификации выполнен конфузorno-диффузорный пережим. В верхнем торце газификатора установлена пылегазовая горелка, обеспечивающая расход твердого топлива 300-500 кг/ч. Установленная мощность газификатора – 5МВт. Установка работает под давлением 2 МПа, а в качестве окислителя используется кислород чистотой 75-80%.

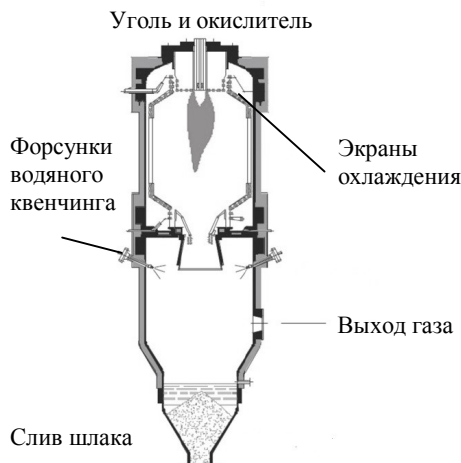


Рис. 1. Пилотный газификатор Siemens

ГАЗИФИКАТОР НПО ЦКТИ

Газификатор ЦКТИ имеет аналогичную конструкцию, но отличается пропорциями: камера газификации имеет диаметр 0.21 м и высоту 1.6 м (рис. 2). В нижней части также находится камера охлаждения (секция водяного квенчинга и шлаковая ванна). Части соединены друг с другом водоохлаждаемым кольцом и не имеют пережимов. Установка предназначена для работы при давлении 0.1-1.6 МПа с расходом угля 5-25 кг/ч и расходом кислорода 2.6-13 м³/ч. В зависимости от режима работы мощность газификатора варьируется в широком диапазоне 30-160 кВт.

ПРОЦЕСС МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для расчета скоростных параметров движения потока внутри газификаторов использовалась модель турбулентности k-ε стандартного вида. Выбор данной модели был обусловлен характером движения рабочей среды. Расчетное моделирование установок Siemens и ЦКТИ производилось не во всем смоделированном объеме установок, а на сегментах в 5 и 45 градусов, соответственно. Данный шаг был сделан для оптимизации вычислительного процесса и наиболее полного использования вычислительных мощностей ЭВМ. Геометрия газификатора ЦКТИ обладает лучевой симметрией (45°) из-за восьми отверстий выхода окислителя в форсунке горелки. Расчетная сетка данного сегмента состояла из 1,7 млн элементов. В случае с зарубежной установкой достаточно сегмента в 5°.

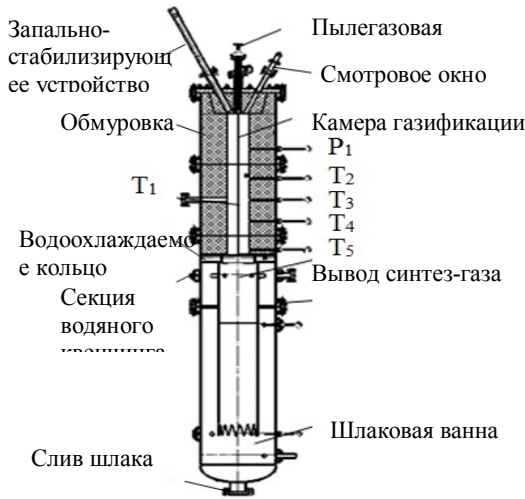


Рис. 2. Пилотный газификатор НПО ЦКТИ

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСЧЕТНОЙ СЕТКИ

Поскольку газификатор НПО ЦКТИ ранее моделировался с учетом гетерофазных реакции газификации кузнецкого каменного угля марки Д [2] гидродинамика была рассчитана на подробной (1,7 млн элементов) сетке. А в случае с установкой Siemens моделирование производится нами впервые, поэтому для гарантирования точного и достоверного результата была решено произвести исследование влияния количества расчетных элементов сетки на параметры гидродинамики. Были произведены расчеты распределения скорости в газификаторе Siemens с использованием сеток, содержащих 35 тыс., 125 тыс., 150 тыс., и 231 тыс. элементов, принадлежащих расчетной области. Ограничение в 231 тыс. элементов обосновано вычислительными особенностями ЭВМ. Для наиболее наглядного и точного сравнительного исследования были построены графики зависимости продольной скорости от высоты газификатора для расчетных сеток с различным количеством элементов. (рис. 3).

Анализируя полученные графики зависимости минимальной продольной скорости от высоты газификатора мы наблюдаем, что на расстоянии до 1,6 метра от горелки практически нет отличий в результатах, полученных на всех сетках, а на оставшемся участке мы можем наблюдать значительные различия в полученных величинах. С увеличением количества элементов расчетной сетки однообразие значений минимальной продольной скорости увеличивается. Что касается максимальной продольной скорости, то почти на всей протяженности установки (от 0 до 2,1 м) мы наблюдаем почти идентичные значения, а вот в нижней части камеры охлаждения имеются довольно большие расхождения. Как и в предыдущем случае, мы можем наблюдать стабилизацию значений с повышением количества

расчетных элементов в сетке. Таким образом можно сделать заключение о необходимости выполнения дальнейших сравнительных исследований именно с сеткой с максимальным количеством элементов. А так же о необходимости дальнейшего исследования на наиболее высокопроизводительных ЭВМ и построения сетки с большим количеством расчетных элементов.

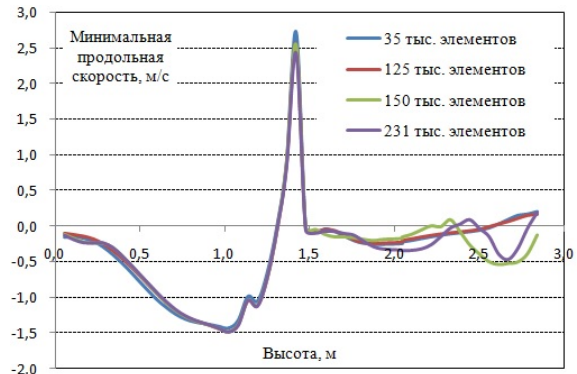


Рис. 3. Зависимость минимальной продольной скорости от высоты газификатора Siemens

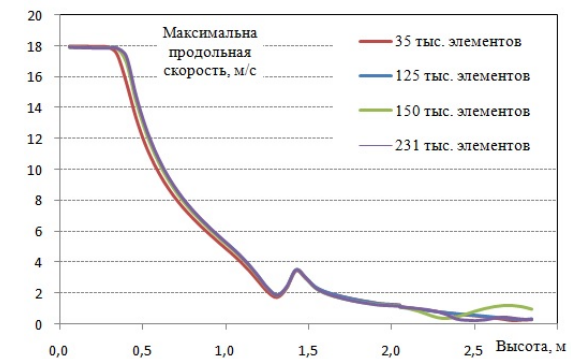


Рис. 4. Зависимость максимальной продольной скорости от высоты газификатора Siemens

РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНИТЕЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчётные результаты для сравнения гидродинамических особенностей работы обеих установок представлены на рисунках 5 и 6.

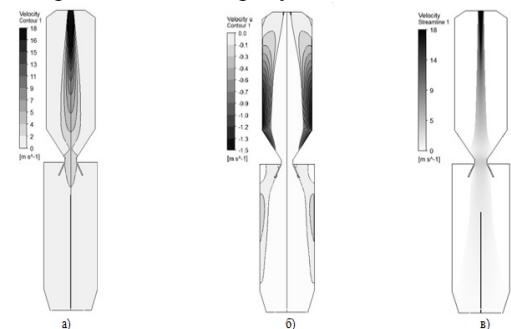


Рис. 5. Результаты моделирования газификатора Siemens:

а) абсолютная скорость; б) скорость возвратных токов; в) линии тока газов.

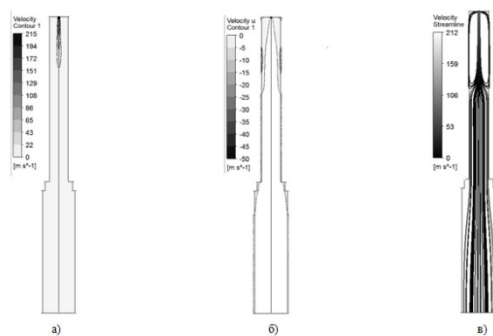


Рис. 6. Результаты моделирования газификатора ЦКТИ:

а) абсолютная скорость; б) скорость возвратных токов; в) линии тока газов.

Как видно из рисунка 5а область высокоскоростного околосевого течения заканчивается почти на выходе из камеры газификации. На рисунке 6а, который иллюстрирует распределение скоростей в газификаторе ЦКТИ, данная область заканчивается на одной пятой части длины камеры газификации. Тем не менее, в обеих установках эта область имеет длину приблизительно около двух калибров. Большая разница пиковых скоростей установок Siemens и ЦКТИ (18 м/с и 215 м/с соответственно) обуславливается различным способом представления форсунок горелок при моделировании. Точная геометрия горелочного устройства газификатора Siemens в открытой литературе не обнаружена, поэтому форсунка горелки была представлена как круглое отверстие диаметром равным суммарному диаметру всего горелочного устройства. В случае с ЦКТИ геометрия моделируемой форсунки полностью соответствовала геометрии реального прототипа, то есть отверстия для кислорода имели диаметр много меньший диаметра горелки.

Распределение обратных токов в данных установках (рис. 5б и 6б) эквивалентно областям с максимальной скоростью, то есть в газификаторе Siemens они распределены по всей высоте камеры газификации, а в ЦКТИ только по третьей части длины. Так же стоит обратить внимание на наличие зон обратных токов в камере охлаждения газификатора Siemens, в котором обратные течения развиты в связи с наличием пережима между камерами газификации и охлаждения. В камере охлаждения ЦКТИ обратные токи

расположены только в местах внезапных расширений. Пики обратных токов газификатора Siemens совпадают с местом расположения форсунок водяного квенчинга, что интенсифицирует перемешивание газа с водой и, следовательно, его охлаждение. На рисунках 5в и 6в изображены линии тока газовой фазы. В случае с зарубежной установкой наблюдается равномерное падение скорости от входа в камеру газификации до выхода из камеры охлаждения. В отечественном газификаторе имеется резкое падение скорости от максимальных значений (212 м/с) до умеренных величин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе сравнения расчетной гидродинамики данных установок можно выделить основные различия их в работе, которыми являются относительные длины областей обратных токов, а так же характер возвратных течений в камерах охлаждения. Основные параметры работы совпадают, что говорит о возможности проведения сравнительного анализа экспериментальных данных по газификации углей в этих установках. Исследование сетки показало, что в дальнейшем необходимо произвести исследование зарубежного газификатора с наиболее плотной расчетной сеткой. В дальнейшем запланировано моделирование работы установок с учётом процесса газификации твёрдого топлива.

Исследование выполнено в Уральском федеральном университете за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-00524).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. San Shwe Hla, Daniel G. Roberts, David J. Harris. A numerical model for understanding the behaviour of coals in an entrained-flow gasifier // Fuel Processing Technology. 2015. № 134. С. 424–440.
2. Абаймов Н.А., Шурчалин А.А., Шестаков Н.С., Осипов П.В., Рыжков А.Ф. Экспериментальное и численное исследование поточной газификации угля при повышенном давлении и различных составах дутья // Материалы IX Всероссийской конференции с международным участием Горение топлива: теория, эксперимент, приложения (16–18 ноября 2015 г.) / Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск. 2015. Электронное издание.