УДК 621.438:621.311.22

ГИДРОДИНАМИКА СВЯЗАННЫХ СИСТЕМ С КИПЯЩИМ И ЦИРКУЛИРУЮЩИМ КИПЯЩИМ СЛОЕМ

Рябов Г.А., Фоломеев О.М., Санкин Д.А., Ханеев К.В.

ОАО «Всероссийский теплотехнический научно-исследовательский институт», Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Рассмотрены вопросы комплексного использования твердых топлив (энерготехнологические установки), которые в последнее время за рубежом позиционируются как полигенерирующие системы с получением тепла, электроэнергии и полезных продуктов (синтетический газ, смолы, жидкое топливо). Показаны преимущества подобных систем со связанными аппаратами с циркулирующим кипящим слоем (дожигатель полукокса) и кипящим слоем (пиролизер). Важным для работы таких установок является обеспечение надежной циркуляции частиц между реакторами и высокой степени улавливания частиц. Приведены данные об аэродинамической установке для проведения исследований работы связанных реакторов, сооруженной в ОАО «ВТИ». Исследования проводятся в соответствии с соглашением о научной кооперации между ОАО «ВТИ» и Шеньянским университетом в Китае.

Исследования гидродинамики связанных реакторов также крайне важны для технологии сжигания и газификации в химических циклах (CLC) с целью улавливания CO_2. Эти исследования выполнялись в ОАО «ВТИ» по государственным контрактам с Федеральным агентством по науке и инновациям РФ.

ВВЕДЕНИЕ

Россия обладает около 20% мировых запасов угля. Принятая в 2006 году инвестиционная программа развития электроэнергетики предусматривает рост доли использования угля в топливном балансе до 37% в 2015 году. Одновременно ведется работа по гармонизации существующих норм на вредные выбросы (ГОСТ Р 50831-95) с Европейскими, в 2006 году утверждена концепция и программа реализации экологической политики.

Огромное внимание использованию угольных технологий уделяется в Китае. Этому способствует большая доля угля в энергетическом балансе и относительно низкое и изменяющееся качество топлив, поставляемых на электростанции. Широкое внедрение в Китае получили технологии сжигания в кипящем и циркулирующем кипящем слое, разрабатываются установки с внутрицикловой газификацией твердых топлив. В последнее время активно ведутся разработки с целью снижения выбросов CO_2 путем его улавливания из дымовых газов и использования специальных технологий удаления (сжигание в среде кислорода, использование химических циклов и другие).

Важное значение придается разработкам так называемых полигенерирующих систем с несколькими аппаратами кипящего (КС) или циркулирующего кипящего слоя (ЦКС), в которых происходят процессы газификации (пиролиза) и сжигания с одновременным получением целевых продуктов (например, ценных смол) при очистке генераторного газа и получения жидких моторных топлив.

Другим направлением применения связанных реакторов с ЦКС и КС является улавливание CO_2 в химических циклах с использованием оксидов металлов – носителей кислорода или сорбентов для удаления CO_2 из дымовых газов.

Важным для работы установок со связанными между собой аппаратами, оснащёнными аппаратами с ЦКС и КС, является обеспечение надежной циркуляции частиц между реакторами и высокой степени улавливания частиц.

ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПОЛИГЕНЕРИРУЮЩИМ СИСТЕМАМ

На рис.1 приведена схема основных элементов полигенерирующей системы, в которой объединены процессы пиролиза, газификации и сжигания твёрдого топлива при высокой

© Рябов Г.А., Фоломеев О.М., Санкин Д.А., Ханеев К.В.

эффективности его конверсии, малых вредных выбросах и умеренных инвестициях. Такая схема считается наиболее приемлемой для установок небольшой и средней мощности с выработкой электроэнергии, тепла и побочных продуктов.

Современные полигенерирующие технологии могут быть разделены на три категории:

- полигенерирующие системы, основанные на полной газификации угля, такие как применяет компания Shell;
- полигенерирующие технологии, основанные на частичной газификации угля – комбинации его газификации и сжигания, которые интегрируются в комбинированный цикл ПГУ;
- полигенерирующие технологии на основе пиролиза угля.

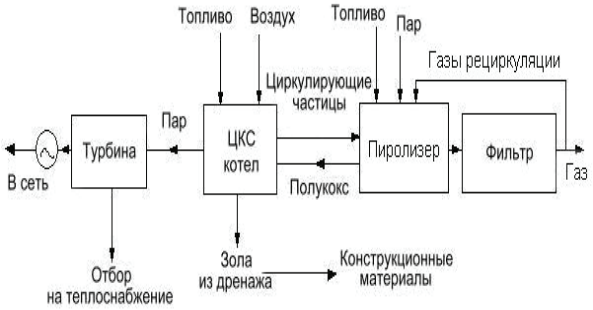

Рис.1 Схема полигенерирующей установки со связанными реакторами КС и ЦКС

Полигенерирующие системы пиролиза угля имеют множество модификаций. Примером могут служить применявшиеся в СССР установки для переработки сланцев. Многочисленные исследования и разработки в этом направлении были сделаны в 70-ые годы ЭНИН им. Кржижановского. Технология была реализована в промышленных установках типа УТТ (УТТ – установка с твердым теплоносителем). Две наиболее крупных установки этого типа УТТ- 3000 производительностью по сланцу 139 т/ч сооружены на Эстонской ГРЭС. Эта установка в настоящее время успешно эксплуатируется в Эстонии.

Надежная работа связанных между собой аппаратов с КС и ЦКС во многом определяется эффективностью улавливания частиц и гидродинамикой систем

их возврата и перетока между аппаратами. Исследование этих процессов ведёт ОАО «ВТИ» на созданной в институте экспериментальной установке (рис.2). Основными элементами такой установки являются реактор с циркулирующим кипящим слоем (ЦКС), транспортный реактор (ТР) и связанный с ними системой перетоков реактор с кипящим слоем (КС).

Реактор с ЦКС представляет собой вертикальную колонну высотой 5,4 м, собранную из девяти секций сечением 300×200 мм и высотой 600 мм. К верхней части секции № 9 присоединен патрубок циклона. Конструкция циклона разработана с учетом ряда отечественных и зарубежных рекомендаций по повышению эффективности улавливания частиц. Выхлопной патрубок выполнен съемным с возможностью изменения диаметра, высоты и конфигурации

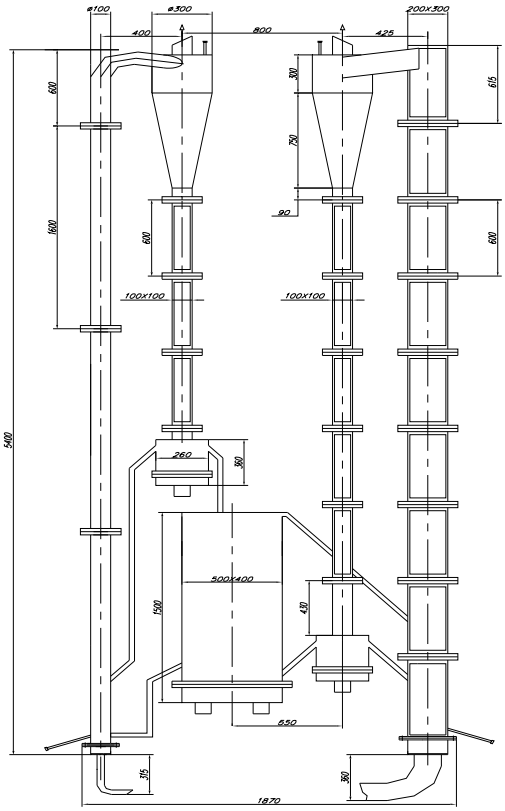

Рис.2 Схема аэродинамической установки ВТИ

(например, с перфорацией по высоте). Он установлен эксцентрично к оси циклона с расстоянием между осями патрубка и циклона 50 мм.

К конусной части циклона присоединен опускной стояк, состоящий из трех секций, сечением 100×100 мм. Нижняя часть стояка соединяется с псевдоожиженным затвором. Конструкция затвора позволяет направлять потоки материала в верхнюю часть секции №1 и (или) в верхнюю часть реактора с кипящим слоем.

Транспортный реактор представляет собой вертикальную колонну высотой 5,4 м, собранную из трех секций диаметром 100 мм и высотой 1600 мм. Также как в реакторе с ЦКС по всей высоте транспортного реактора и опускного стояка установлены штуцеры для измерения давления.

Реактор с кипящим слоем представляет собой вертикальный сосуд сечением 400×400 мм и

высотой 1500 мм. В нижней части реактора размещена колпачковая воздухораспределительная решетка с камерой для подвода воздуха. Внутри реактор разделен съемной перегородкой на две равные секции сечением 200×200 мм. Отвод материала осуществляется через патрубок, который расположен в нижней части реактора и соединен с секцией № 1 реактора с ЦКС посредством "L" – клапана. В этой секции воздух и материал движутся по противоточной схеме, т.е. навстречу друг другу. Во второй секции реактора воздух и материал движутся по прямоточной схеме, для чего материал из транспортного реактора вводится через патрубок расположенный в нижней части, а выводится из средней части реактора. По высоте каждой секции имеются по три патрубка для отбора давления.

В работах, выполненных Институтом тепловой энергетики Университета в Zhejiang [1, 2], представлены данные исследований на пилотной установке мощностью 1 МВт. Первые результаты показали, что установка позволяет производить газ с теплотой сгорания 12 – 14 МДж/м^3 и содержанием 5 – 6% смолы при температуре в КС 500 – 600 ^{o}C. Было показано, что циркуляция твердых частиц является критическим параметром для стабильной работы установки.

ОАО «ВТИ» имеет богатый опыт исследований гидродинамики аппаратов с циркулирующим кипящим слоем и оригинальные методики испытаний. Аэродинамическая установка ВТИ и применяемые на ней методы исследования подробно описаны в отечественных и зарубежных публикациях [3, 4]. На ней одновременно применяются метод определения локальных массовых потоков частиц с помощью S-образного изокинетического зонда, метод определения локального теплообмена к датчикам при их нагреве, использовались также миниатюрные турбинные расходомеры и различные датчики концентрации.

На базе этих исследований показано, что:

- профиль давления и концентрации по высоте связанных реакторов с ЦКС и КС характерны для отдельных реакторов этого типа и зависят от скорости газа и уровня загрузки (массы слоя);
- изменение давления в характерных точках установки зависит как от режимных параметров, так и от особенностей конструкции аппаратов и систем возврата.

В работах ОАО «ВТИ» на аналогичной установке показано, что размер частиц определяет величины основных безразмерных критериев (Ar, Re, Fr), используемых для расчета гидродинамики и тепломассообмена. Оказалось, что изменение среднего размера частиц по ширине установки невелико. Например, при отборе проб на отметке 4,87 м от решетки при скорости воздуха 4,4 м/с и массе слоя 85 кг средние размеры частиц песка отличались всего на 5%. В опускном потоке, как вблизи стен, так и в центральной зоне количество крупных фракций выше, чем в подъемном потоке. При этом фракционный состав частиц, движущихся вверх в пристенной зоне и центре потока одинаков. В опускном потоке вблизи стен движутся несколько более крупные частицы, чем падающие в центральной зоне. В режиме ЦКС имеется примерное равенство средних размеров частиц в опускной зоне и в центре потока. При этом как в центре, так и у стенки, возможно, существуют агломераты частиц (кластеры). Однако при отборе частиц и их ситовом анализе кластеры распадаются.

Для режима ЦКС характерным является слабая зависимость (или ее отсутствие) размеров частиц от высоты. Оказалось, что при скорости воздуха более 4 м/с для песка и 5 м/с для анионита размеры отобранных из потока частиц близки к размерам загруженных частиц.

В наших опытах в основном определялись значения расхода циркулирующего материала по внешнему контуру Gц, так как именно эта величина является наиболее важной для работы связанных реакторов с кипящим слоем. Она возрастает с увеличением скорости в аппарате с ЦКС и массе слоя в нем. Типичная зависимость подобного рода представлена на рисунке 3.

Эти зависимости характерны для стабильных режимов установки, в которых есть возможность достаточного запаса пропускной способности стояков и затворов. В противном случае начинается перераспределение массы в элементах установки.

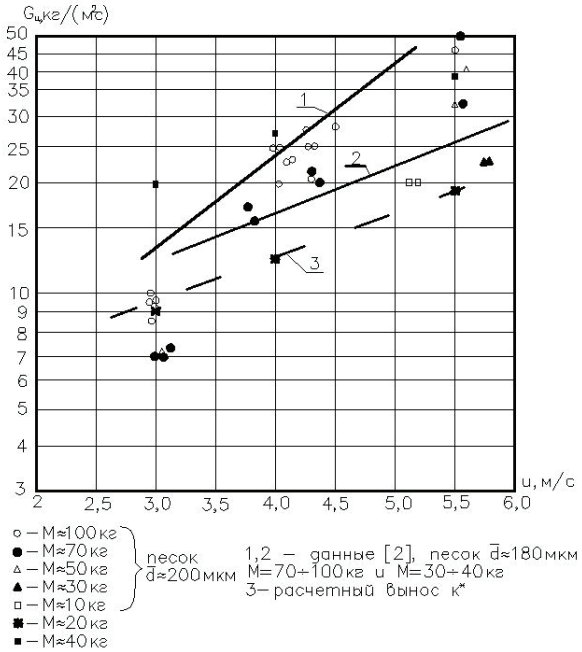

Рис.3. Типичные зависимости изменения расхода циркулирующего материала от скорости и массы слоя

Например, при ограничении пропускной способности стояка и затвора под циклоном аппарата с ЦКС происходит накопление материала в стояке, масса слоя в аппарате с ЦКС снижается и тем самым приводит к снижению расхода циркулирующего материала. В опытах это получалось, если уменьшалась подача воздуха в пневмозатвор. Такой режим можно допускать до определенного значения подъема уровня в стояке – недопустимо появление уровня в циклоне, что приводило к резкому ухудшению эффективности улавливания. Если ограничить выход материала из аппарата с кипящим слоем, то в нем происходит накопление материала, одновременно снижается расход циркулирующего материала и устанавливается новый баланс масс в элементах установки при сниженном расходе циркулирующего материала.

Обнаруженные явления показывают, что управление системой может осуществляться за счет работы пневмозатворов, причем пропускная способность системы должна быть заведомо больше возможного максимального выноса из аппарата с ЦКС. В этом плане в некоторых зарубежных исследованиях получены данные, которые дают искаженную интерпретацию работы систем со связанными реакторами.

Очевидно, что, подавая различные расходы воздуха в затвор (при его недостаточном для максимального пропуска материала количестве) в установках с определенными запасами емкости материала в элементах можно получать различные расходы материала в контуре циркуляции.

ХИМИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ ДЛЯ УЛАВЛИВАНИЯ CO_2

Многочисленные исследования работы связанных реакторов с КС и ЦКС выполнены применительно к сжиганию в химических циклах, где в качестве материала слоя используются оксиды металлов. В настоящее время по данным [5] насчитывается уже более 600 работ по различным аспектам использования химических циклов. В ходе экспериментов установлено, что возможна почти полная конверсия топлива при 100% улавливании CO_2. Большинство работ направлено на исследование сжигания газа. Пока еще только на одной установке в Швеции (Институт Чалмерса) использовали битуминозный уголь и нефтяной кокс. При этом в качестве оксидов металлов – носителей кислорода применялся природный минерал (ильменит). Мировой эксплуатационный опыт сжигания топлив в химическом цикле, включающих носители кислорода с основой на Ni, Fe, Mn, Cu и Co оксидах, насчитывает более 1000 часов.

Технология сепарации CO_2 с использованием химических циклов сжигания топлив основана на принципах псевдоожиженного слоя. При этом используются два реактора с кипящим слоем: восстановительный (топливный) и окислительный (воздушный), которые связаны между собой с помощью системы улавливания и возврата оксидов

металлов – носителей кислорода. Оба реактора могут работать в режиме пузырькового кипящего слоя с организацией перетоков в виде транспортных подъемных стояков. Учитывая, что реакция восстановления оксидов металлов с помощью газообразного топлива идет значительно медленнее, чем реакция окисления, наиболее предпочтительным и компактным является вариант с топливным реактором кипящего слоя и воздушным реактором с циркулирующим кипящим слоем. Необходимо также отметить, что расход газа по крайней мере в 10 раз ниже, чем расход воздуха. Это означает, что скорости ожижения в воздушном реакторе должны быть соответственно выше, чем в топливном реакторе.

Среди последних работ следует отметить работу [6]. В этой работе показано, что удельный расход циркулирующего материала зависит от доли первичного воздуха и увеличивается при различных массах слоя и расходах воздуха в нижний затвор. Циркуляция твердых частиц увеличивается, если большая часть ожижающего воздуха вводится на уровне первичного воздуха. Если больше материала слоя присутствует в системе, то гидростатическое давление выдавливает частицы из топливного реактора в воздушный реактор через нижний затвор и, таким образом, увеличивает концентрацию и время пребывания частиц в воздушном реакторе. В наших исследованиях качественно получены аналогичные результаты. При проектировании установок с химическими циклами необходимо связать показатели химических реакций восстановления и окисления оксидов металлов и параметры гидродинамики. Например, формула (1), определяющая массовый расход частиц (m_{sol}), расход воздуха (m_o), разницы в степенях конверсии в окислительном и восстановительном реакторах (ΔX) и емкость по кислороду оксидов металлов (R_0).

$$m_{sol} = m_o/(\Delta X^* C_{ox}) \quad (1)$$

Кратность циркуляции частиц по отношению к расходу воздуха (или расходу метана, которые четко связаны) уменьшается при увеличении емкости оксидов по кислороду, так как C_{ox} пропорционально R_0. С другой стороны расход частиц не является параметром, зависящим от химических процессов, а определяется скоростью газа, его физическими свойствами и размерами и плотностью частиц. Кроме того, необходимо учесть и эффективность улавливания частиц в сепараторе. Это значит, что зависимым в формуле (1) будет

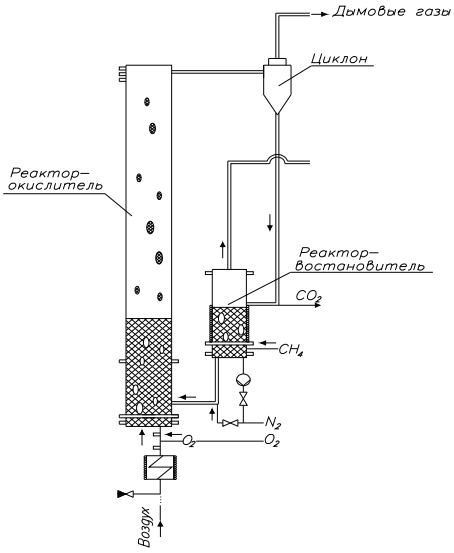

Рис.4 Установка ВТИ для исследования условий сжигания топлив в химических циклах

фактически значение в разнице степеней конверсий в реакторах и степень конверсии в окислительном реакторе (X_{ox}). При заданных значениях показателей реактивности формула (1) дает нижний предел расхода циркулирующих частиц.

В ОАО «ВТИ» создана экспериментальная установка для сжигания топлив в химических циклах (рис.4).

Важным в части гидродинамики систем со связанными реакторами является использование L-клапана для перетока материала из топливного реактора в окислительный. Такое решение позволяет обеспечить компактность всей установки. Работы по исследованию движения в стояках и L-клапанах, выполненные ОАО «ВТИ» и показали возможность регулирования подачи материала при воздействии воздуха, подводимого в вертикальную часть стояка на уровне одного диаметра горизонтальной части клапана. Работы в этом направлении продолжаются.

ВЫВОДЫ.

По результатам исследований циркуляции и работы системы возврата связанных реакторов можно сделать следующие выводы:

- профиль давления и концентрации по высоте связанных реакторов с ЦКС и КС характерны для отдельных реакторов этого типа и зависят от скорости газа и уровня загрузки (массы слоя).
- изменение давления в характерных точках установки зависит как от режимных параметров, так и от особенностей конструкции аппаратов и систем возврата.
- расход циркулирующего материала в системе связанных реакторов с КС и ЦКС зависит от скорости газа и массы (уровня слоя) слоя в реакторе с ЦКС при условии высокой степени улавливания частиц и достаточной пропускной способности системы возврата частиц и постоянном их диаметре;
- подтверждены данные исследований ОАО «ВТИ» на холодных моделях по влиянию скорости воздуха и массы слоя на гидродинамику в реакторе с ЦКС и работу системы возврата частиц;
- система возврата слоя (стояк и пневмозатвор) должны иметь запас необходимой пропускной способности и регулироваться за счет ожижения в стояке и подъемной части петлевого затвора. В противном случае расход циркулирующего материала определяется режимом работы пневмозатвора и его конструктивными характеристиками, что отмечено в ряде зарубежных исследований.
- разработаны основные элементы расчетной модели циркуляции и сепарации частиц в связанных реакторах с кипящим слоем. Расчетная модель циркуляции и сепарации частиц в связанных реакторах с кипящим слоем состоит из блоков расчета гидродинамики аппаратов с пузырьковым кипящим слоем (газификатор, пиролизер), расчета гидродинамики аппаратов с ЦКС (профиль давлений и концентраций, расход циркулирующих частиц), расчета сепарации частиц и расчета элементов системы возврата.

ЛИТЕРАТУРА

1. M. Fang, Q. Wang , C. Yu, Z. Shi, Z. Luo, K. Cen, Development of Gas Steam and Power Multi-Generation System, Proc. of 18th Int. Conf. on FBC, May 22-25, 2005, Toronto, Ontario, Canada.
2. M. Fang, J. Cen, Q. Wang, K. Cen,. Z. Cao, X. Zhang, J. Shu, X. Rao, G. Dong, J. Wang, Y. Wang, Study on Coal Combustion and Pyrolysis Gas Tar and Steam Polygeneration System, Proc. of 9th Int. Conf. on CFB, May, 2008, Hamburg, Germany.
3. Фоломеев О.М., Трухачев С.Н., Рябов Г.А. Исследование гидродинамики и тепломассообмена применительно к условиям работы надслоевого пространства котлов с циркули-

рующим кипящим слоем, Теплоэнергетика №10, 2000 г., стр. 27-32.

4. G.A. Ryabov, O.M. Folomeev, D.A. Shaposhnik, Solid separation in upper part of CFB riser, Proc. of the 8-th Int. Conf. on CFB, Hangzgou, China, May 10-13, 2005.
5. A. Lyngfelt, M. Johansson, T. Mattisson, Chemical looping combustion – Status of development, Proc. of CFB 9, May 13-16, Hamburg, Germany, pp 39-53
6. T. Proll, K. Rupanovits, P. Kolbitsch, J. Bolhar-Nordenkampf, H. Hofbauer, Cold Flow Model Study on a Dual Circulating Fluidized Bed (DCFB) System for Chemical Looping Processes, Proc. of CFB-9, Germany, Hamburg, May 2008