УДК 661.961.62

**Анализ перспективных схем двухходовых высокотемпературных реакторов**

Цыганова В.Д.

Научный руководитель – ст. преподаватель Савченко Г.Б.

*Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова*

Ввиду все большей распространенности беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) на топливных элементах (ТЭ) для заправки бортовых газовых баллонов была разработана принципиальная схема мобильного заправочного комплекса (МЗК) получения водорода. В основу такого типа установок положена технология двухступенчатого получения водородсодержащего газа путем парциального окисления сырья и последующей паровой каталитической конверсии монооксида углерода СО. Основным конструктивным узлом установки является высокотемпературный реактор (ВТР).

Чтобы упростить, а в перспективе – частично автоматизировать процесс проектирования ВТР, с опорой на разработанный под конкретную задачу МЗК ранее был создан обобщенный алгоритм проектирования [1,2].

На основе полученного алгоритма был проведен поиск технических решения по совершенствованию отдельных узлов установки [3, 4, 5]. Среди основных целей стояло снижение массы и габаритов оборудования, что является важным фактором для обеспечения мобильности и скрытности всего комплекса.

Для решения указанной задачи среди прочего предлагается внедрение ВТР новой конструкции – многоходовой (коаксиальной), которая является развитием известной конструкции по патенту RU №2521377 С2 [6]. Принципиальная схема предлагаемого многоходового ВТР представлена на рисунке 1, а пример традиционного последовательного реактора для сравнения изображен на рисунке 2.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| Рисунок 1 – Схема многоходового (коаксиального) ВТР | Рисунок 2 – ВТР традиционной последовательной конструкции |

Традиционный ВТР состоит из последовательно расположенных охлаждаемых камеры сгорания (КС), блока впрыска продуктовой воды и испарительной камеры (ИК). Впрыск воды необходим для снижения температуры газа до рабочей температуры блока конверсии, а также для увлажнения газа – с целью обеспечения условий для последующего проведения паровой конверсии.

В предлагаемой конструкции КС и ИК расположены не последовательно, а концентрически, разделение камер обеспечивается цилиндрическим вкладышем. Такая схема позволяет резко уменьшить продольные габариты ВТР и получить ряд дополнительных преимуществ.

При детальной проработке конструкции коаксиального двухходового ВТР необходимо обратить внимание на следующий ряд факторов:

* необходимость охлаждения разделительной стенки между КС и вторым ходом реактора - ИК;
* строгую связь количества потребной продуктовой воды с расходом и соотношением основных компонентов;
* высокую теплонапряженность днища ВТР;
* разворот потока продуктов сгорания (ПС) на 180 градусов при переходе из КС в ИК;
* интенсивное сажеобразование в реакторе, связанное с работой на богатых горючим смесях, и возможность скопления сажи в застойных зонах.

На основе анализа этих факторов был предложен ряд конструктивных решений.

В классическом варианте последовательного ВТР охлаждение стенок осуществляется проточной водой по т.н. «рубашке охлаждения». Причем, для подачи воды охлаждения требуется отдельный контур с насосом, баком и градирней.

Температура на выходе из испарительной камеры по условию работоспособности блока конверсии СО не должна превышать 6500С, т.е. для неё можно использовать обычные жаростойкие стали, без охлаждения стенок. Но в КС температура достигает 20000С и выше, что недопустимо для материала вкладыша, разделяющего КС и ИК. Решить эту проблему в многоходовом ВТР можно тремя способами:

* традиционным – независимым охлаждением разделяющей стенки проточной водой;
* внедрением внутреннего парогенератора;
* комбинацией этих двух методов.

На рисунке 1 представлена комбинированная схема. Использование внутреннего парогенератора позволяет охлаждать вкладыш продуктовой водой, что при определенных условиях может позволить отказаться от охлаждения оборотно й водой или упростить систему ее подачи.

Внутренний парогенератор выполняется в виде цилиндрического вкладыша из материала с высокой теплопроводностью (например, из хромистой бронзы). Вкладыш помещается концентрически в объем КС, в результате чего образуются две стенки: огневая – контактирующая с ПС, и промежуточная – между огневой и выходящим из реактора газом. По зазору между ними подается продуктовая вода для тех же целей, что и в ВТР традиционной конструкции через блок впрыска. В парогенераторе она также обеспечивает теплоотвод от стенок, исключая возможность их прогара.

При анализе теплообмена в парогенераторе можно выделить четыре основных участка.

Первый участок (I на рис.3) – нагрев жидкой воды от температуры подачи до температуры кипения. На данном участке вся подаваемая вода находится в жидкой фазе. Огневая стенка не позволяет смешиваться ПС и продуктовой воде, что особенно важно на начальном этапе горения в КС.

|  |  |
| --- | --- |
|  | Рисунок 3 – Участки парообразования в тракте подачи продуктовой воды.  1 – огневая стенка, 2 – промежуточная стенка |

Далее идет начальный участок испарения (II на рис.3). На данном участке начинается процесс испарения воды около огневой стенки. Чтобы кипение здесь и на последующих участках имело не пузырьковый, а пленочный характер, необходимо создать условия для разделения фаз. Для этого в зазоре между стенками создаются спиральные каналы, благодаря чему появляется центробежная сила, прижимающая жидкую воду к промежуточной стенке (рис.4 A).

На нижней границе огневой стенки начинается третий участок – свободный (III на рис.3). Здесь жидкофазная вода продолжает стекать вдоль стенки, а водяной пар начинает перемешиваться с ПС. Поскольку ПС не контактируют напрямую с промежуточной стенкой, её температура остается приемлемо низкой.

В нижней части КС, где заканчивается промежуточная стенка, начинается четвертый участок – смесительный (IV на рис.3), где за счет поворота потока происходит интенсивное перемешивание ПС, водяного пара и жидкофазной остаточной воды, которая полностью доиспаряется.

Таким образом, на всем протяжении вкладыша обеспечивается защита стенок от прогара. На участке I – за счет отвода тепла в жидкость через огневую стенку, на участке II – за счет отвода теплоты на парообразование так же через огневую стенку, на последующих участках – за счет отвода тепла от промежуточной стенки и ПС в плёнки воды и пара.

Основная сложность рассмотренной схемы связана с тем, что в парогенераторе охлаждение стенок производится продуктовой водой. При этом в ВТР различной производительности её количество может оказаться как избыточным, так и недостаточным для охлаждения, т.к. зависит от расходов и соотношения горючего и окислителя. Поэтому система охлаждения требует расчета в привязке к количеству подаваемой продуктовой воды. При её недостатке можно использовать комбинированную схему охлаждения.

Наряду со стенками в двухходовом ВТР есть еще один теплонапряженный элемент – днище. Оно расположено непосредственно под зоной горения – там, где происходит разворот горячего потока ПС. Решить проблему высоких температур в данной области можно введением проточного охлаждения днища, аналогичного схеме охлаждения промежуточной стенки. Вариант реализации проточного независимого охлаждения днища парогенератора (рис. 4 C) целесообразен, когда продуктовой воды недостаточно для охлаждения стенок вкладыша. В случае, когда количество продуктовой воды с точки зрения охлаждения стенок избыточно, ее можно разделить на два потока, и направить один в охлаждающий тракт днища с последующей подачей внутрь ВТР (рис. 4 D).

|  |  |
| --- | --- |
|  | Рисунок 4 – Собирательная схема конструктивных решений многоходового ВТР  А – Вкладыш с воронкой;  В – Вкладыш с боковой подачей;  С – Охлаждение днища проточной водой;  D – Охлаждение днища продуктовой водой с подачей в ВТР. |

Самой сложной из обозначенных является проблема интенсивного сажеобразования в реакторе. В предлагаемой двухходовой схеме ВТР наиболее крупные и слипшиеся мелкие частицы будут оседать на дне в центральной части реактора, в застойных зонах. Там будет образовываться слой сажи, ухудшающий температурные условия работы днища и забивающий технологическое сливное отверстие.

Традиционный способ борьбы с сажей – использование реакции водяного газа, протекающей по уравнению:

Чтобы создать благоприятные условия для её протекания, необходимо подавать водяной пар в количестве до 20% от массового расхода горючего максимально близко к области образования и скопления сажи.

Рассмотренный выше парогенератор со свободным участком (участок III рис.3), на котором имеется слой водяного пара, эту проблему решает автоматически, т.к. наибольшее сажеобразование наблюдается именно в пристеночных, холодных, зонах КС. Так же можно организовать сброс части пара в КС и через отверстия в огневой стенке на участке II (рис.3).

Для организации зоны с благоприятными условиями протекания реакции водяного газа в нижней части ВТР можно использовать направленный сброс пара и воды на границе КС – под углом к оси ВТР, или поперек потока продуктов сгорания. В случае с поперечной подачей воды она поступает в КС через щель или отверстия, расположенные на нижней границе вкладыша. Поскольку такие отверстия выполняют роль форсунок, обеспечивается хорошее распыление и смешение. Схему целесообразно использовать при гарантированном избытке продуктовой воды над требованием расхода по охлаждению стенок.

Сброс воды и пара поперек потока ПС или под углом, в отличие от сброса по оси ВТР, также снижает остроту проблемы охлаждения днища, т.к. резко снижается температура газов за счет смешения потоков.

Разворот потока на 180 градусов приводит к потерям давления, образованию застойных зон и отложению твердых частиц на внутренней поверхности ВТР. Поэтому на участке разворота потока целесообразно сделать конусообразное днище, чтобы избежать образования застойных зон и паразитных вихрей.

Таким образом, предложенная схема поможет не только уменьшить габариты ВТР, но и снизить сажеобразование, а в предельном, наиболее благоприятном случае, отказаться от линии подачи воды охлаждения в рубашку промежуточной стенки.

Однако, в отличие от ВТР традиционной схемы, математические модели двух – и более ходовых реакторов на сегодняшний день еще не разработаны. Разработка такой матмодели является следующим этапом работы над данным проектом. По окончании её нужно будет проверить экспериментально на различных вариантах конструкции, так как часть протекающих процессов не поддается моделированию.

**Список источников:**

1. Аникина В.Д. Разработка высокотемпературного реактора в составе заправочного комплекса для обеспечения работы беспилотных летательных аппаратов: 13.03.03 Энергетическое машиностроение. – СПб., 2017 год. – 75 стр.
2. Аникина В.Д., Савченко Г.Б. Алгоритм проектирования установки получения водородсодержащего газа, как топлива летательных аппаратов // Материалы X Всероссийской студенческой научно-технической школы-семинара «Аэрокосмическая декада», ОУЦ Алушта, Республика Крым, 26 сентября - 2 октября 2017г. – М.: Изд-во «Доброе слово», 2017. – с.7-9
3. Аникина В.Д., Савченко Г.Б. Результаты анализа алгоритма проектирования установки получения водородсодержащего газа для топливных элементов // Материалы III Общероссийской научно-технической конференции «Старт-2017» / Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2017.
4. Цыганова В.Д. Новая схема блока каталитической конверсии СО в установках получения водорода // Материалы XVI молодежной научно-технической конференции «Взгляд в будущее - 2018», СПб – АО «ЦКБ МТ «Рубин», 2018 - с.18-24.
5. Аникина В.Д. Конструкция многоходовой камеры сгорания высокотемпературного реактора // Материалы X Общероссийской молодежной научно-технической конференции «Молодежь. Техника. Космос», СПб: БГТУ «Военмех», 2018.
6. Патент №2523824 РФ С01В 3/32 B01J 19/26 Устройство для получения синтез-газа / Филимонов Ю.Н., Анискевич Ю.В. и др., патентообладатель ООО «ВТР» - заявл.№2012130048/05, 06.07.2012, опубл. 27.07.2014, бюл. № 21