

*Б. И. Котомин, В. Ю. Польшиков,
А. А. Алекторов, А. А. Добросоцкий**

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНИКИ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ГОРЕНИЯ ДЛЯ СИНТЕЗА УГЛЕРОДНЫХ НАНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПЛАМЕНИ

При организации производства наноматериалов необходимо учитывать токсичность, пожаро- и взрывоопасность, химическую агрессивность, воздействие на атмосферу исходных веществ и ингредиентов, выделяющихся в процессе синтеза и обработки. На сегодняшний момент предварительные результаты показывают, что риск, связанный с получением наноматериалов, меньше или сравним с риском, связанным со многими другими видами промышленной деятельности. В связи с чем производство нанопродуктов должно, в первую очередь, удовлетворять общим санитарно-гигиеническим требованиям, нормативам по пожаровзрывобезопасности и экологическим стандартам, регламентирующим количество выбросов и отходов производства.

В последнее время наибольшие успехи достигнуты в исследованиях углеродных наноструктурных материалов (УНМ) в виде нанотрубок и нановолокон. Эти два класса наноструктур в наибольшей степени приблизились к переходу от опытного к массовому промышленному производству и применению. Поэтому они в первую очередь должны рассматриваться с точки зрения обеспечения технологической и экологической безопасности. В этой связи весьма эффективным будет использование на всех стадиях производства новых энерго- и ресурсосберегающих технологий, которые обеспечат минимизацию вредных выбросов.

Наиболее простыми теплообменными устройствами, которые на сегодняшний момент широко используются в схемах синтеза УНМ, являются теплообменники с внутренними источниками теплоты, т.е. различного типа электронагреватели. Их достоинствами являются простота устройства и монтажа, а также удобство регулирования. Недостатком – большие эксплуатационные затраты, из-за высокой стоимости электроэнергии.

Одной из доступных альтернатив электрическому нагреву, обеспечивающих необходимые температурные диапазоны в процессах по-

* Работа выполнена под руководством канд. техн. наук, доцента ФГБОУ ВПО «ТГТУ» А. А. Баранова.

лучения катализатора, синтеза УНМ, и на вспомогательных стадиях, может служить использование различного рода горелочных устройств, в которых используется энергия органического топлива. Однако использование традиционных методов сжигания имеет существенные недостатки: невысокий КПД, малая теплонапряженность, экологическая нагрузка за счет высокого содержания в продуктах сгорания монооксида углерода CO , окислов азота N_xO_y , алифатических и ароматических углеводородов C_xH_y . Поэтому применительно к нанотехнологиям необходимо развитие высокоэффективной теплотехники, обеспечивающей требуемый уровень экологической безопасности. В этом направлении весьма перспективным представляется реализация процессов пульсирующего горения в аппаратах специальной конструкции. Такой режим горения позволяет обеспечить максимальную полноту тепловыделения топлива, существенно интенсифицировать тепло-массообменные процессы и повысить теплонапряженность. При таких условиях очевидно уменьшение металлоемкости конструкции, сокращение затрат на монтаж и обслуживание технологического оборудования. Кроме того, продукты сгорания отвечают самым жестким экологическим требованиям.

Конструктивно аппараты пульсирующего горения (АПГ) достаточно просты и включают камеру сгорания, в полости которой реализуется объемное горение топлива, аэродинамический клапан, обеспечивающий подачу воздуха в камеру сгорания в режиме самовсаса без внешних дутьевых устройств, и резонансную трубу, из которой происходит высокоскоростное истечение продуктов сгорания. Аэродинамический клапан, камера сгорания и резонансная труба образуют акустическую систему. На первой собственной частоте этой системы происходит процесс пульсирующего горения в резонансном режиме. Наружные стенки камеры сгорания и резонансной трубы могут служить поверхностями рекуперативного теплообмена для нагрева исходного углеродсодержащего газа при получении УНМ методом газофазного химического осаждения углерода в присутствии катализатора, а горючие газообразные выбросы, выделяющиеся в процессе синтеза, могут быть утилизированы сжиганием в АПГ. Высокоскоростной пульсирующий поток продуктов сгорания может быть использован для получения оксидных катализаторов термическим методом. При смешении продуктов сгорания с воздухом и снижении температуры полученный теплоноситель может использоваться для термической очистки УНМ от неструктурных форм углерода и в качестве сушильного агента на завершающей стадии сушки после операций кислотной отмывки и нейтрализации. Использование АПГ позволяет также осуще-

ствлять нагрев технологических жидкостей. В частности, в рубашке или змеевике, установленном на АПГ можно подготавливать теплоноситель для интенсификации процессов приготовления катализаторного прекурсора и очистки полученного продукта.

В настоящее время с успехом развиваются технологии синтеза углеродных наноструктурных материалов непосредственно в пламени при реализации горения богатых топливных смесей в присутствии катализаторных систем. Обзор литературы и патентный поиск не дали результатов по установлению уровня техники и технологии в области синтеза углеродных наноструктур в пламени аппаратов пульсирующего горения. Это обстоятельство достаточно легко объяснить. Теоретически, в ряде работ [1, 2], показано, что пульсирующее горение можно организовать как в области богатых топливных смесей (с недостатком окислителя), так и в области обедненных (с избытком окислителя). Традиционные теплотехнические процессы выгодно вести с избытком окислителя, обеспечивая тем самым полноту сгорания топлива и малую эмиссию вредных составляющих продуктов сгорания. Поэтому устройства пульсирующего горения традиционно проектируют на обедненные топливные смеси, на которых легко реализуется устойчивое пульсирующее горение в режиме самовсаса без постоянно действующих источников зажигания. Для организации синтеза УНМ в пламени наоборот необходим недостаток окислителя. В этом случае возникают определенные трудности. В частности, нами предприняты попытки модернизации аппарата пульсирующего горения мощностью 20 кВт, работающего на пропан-бутановой смеси с коэффициентом избытка воздуха $\alpha = 1,7 \dots 2$. В качестве мероприятий по снижению количества потребляемого воздуха исследовались следующие технологические и конструктивные решения:

- 1) форсированная подача горючего;
- 2) установка сменных диафрагм в аэродинамическом клапане;
- 3) уменьшение площади сечения аэродинамического клапана за счет организации кольцевого канала.

Все перечисленные методы оказались неэффективными, поскольку в первом случае горение прекращалось после некоторого порогового расхода горючего, соответствующего $\alpha = 0,8 \dots 1$. Во втором и третьем случаях автоколебательное пульсирующее горение не реализовывалось без внешнего воздушного дутья.

Тем не менее, необходимые условия для получения углерода в конденсированной фазе с использованием аппаратов пульсирующего горения можно реализовать.

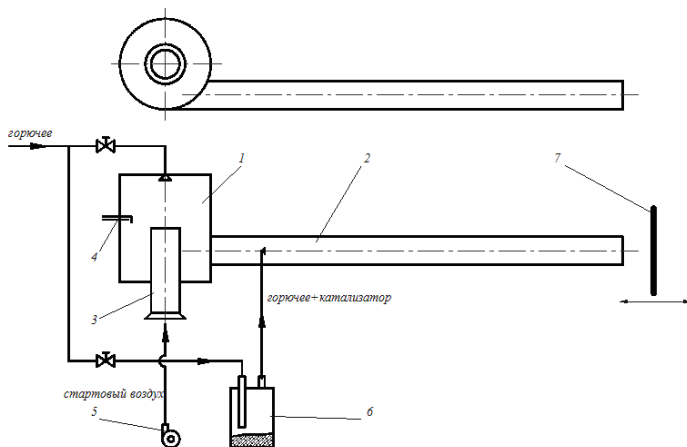


Рис. 1. Схема установки для синтеза углеродных наноструктурных материалов в аппарате пульсирующего горения:
 1 – камера сгорания; 2 – резонансная труба; 3 – аэродинамический клапан;
 4 – запальник; 5 – стартовый вентилятор; б – катализаторная емкость;
 7 – подложка-саженакопитель

Для этого предлагается организовать дополнительный подвод горючего в резонансную трубу АПГ (рис. 1). В этом случае высокотемпературные продукты сгорания обедненной топливной смеси вызовут реакцию крекинга дополнительно поданного углеводорода, а при наличии катализаторных систем приведут к образованию наноструктурного углерода и его отложению на подложке.

Предложенная конструкция установки на базе АПГ позволит провести комплекс запланированных исследований и определить перспективы использования пульсирующего горения для синтеза наноструктурного углерода непосредственно в пламени.

Список литературы

1. *Авакумов, А. М.* Нестационарное горение в энергетических установках / А. М. Авакумов, И. А. Чучкалов, Я. М. Щелоков. – Ленинград : Недра, 1987. – 159 с.
2. *Северянин, В. С.* Пульсирующее горение – способ интенсификации теплотехнических процессов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В. С. Северянин. – Саратов : Саратовский политехн. ин-т, 1987.

*Кафедра «Техника и технологии производства нанопроductов»
 ФГБОУ ВПО «ТГТУ»*