Горелка для получения ацетилена конструкции Артилаква — Панасовского

Леван Шалвович Артилаква
Технический директор НПФ «Химмаш Компрессор-Сервис»
Первая публикация в январе–феврале 2017 года
«Винахідник і раціоналізатор», № 1, рубрика «Технології», с. 24–29
Патент Украины UA101134C2

Термоокислительный синтез ацетилена

В предлагаемом изобретении учтены недостатки существующей конструкции горелочного устройства и приняты технические решения, позволяющие добиться устойчивого горения, увеличить производительность и обеспечить требуемую прочность. По сообщению автора, это позволило увеличить ресурс горелочного устройства на порядок.

Технология термоокислительного синтеза ацетилена разработана группой немецких химиков. Преимущества этого изобретения — высокая селективность реакции и относительная простота конструкции реактора. Уже более ста лет процесс применяется в различных отраслях промышленности для получения как самого ацетилена, так и его производных, в том числе уксусной кислоты, винилацетата, ароматических углеводородов, пластмасс, каучука и ацетиленидов.

Основное условие образования ацетилена из метана — пребывание исходного углеводорода в реакционной зоне при температуре 1600 °C в течение долей секунды с последующим резким охлаждением газовой смеси.

Температуру, необходимую для реакции, получают за счёт сжигания части исходного углеводорода в кислородном пламени в блоке горелочного реактора. Этот процесс называется термоокислительным пиролизом.

При производстве ацетилена до сих пор сохраняется недостаток, повышающий эксплуатационные затраты, связанные с использованием горелок. Высокая скорость газа в горелочной зоне реактора в существующих конструкциях приводит к значительному гидравлическому сопротивлению и необратимым затратам энергии на его преодоление. Поток теряет однородность, образуются вихри, происходит отрыв потока и, как следствие, нарушается устойчивость горения. Высокая температура вызывает некомпенсированное неравномерное тепловое расширение, вследствие чего возникают напряжения, превышающие предел текучести материала горелки. Это ограничивает ресурс горелочного устройства и обусловливает высокие энергозатраты.

Предлагаемое изобретение относится к производству ацетилена термоокислительным пиролизом углеводородов. Оно может применяться в реакторах химической промышленности для производства ацетилена в качестве направляющего и газораспределительного устройства горелок.

Известная горелка и прототип

Известная горелка для получения ацетилена термоокислительным пиролизом метана [1] включает ряд трубок для подачи метанокислородной смеси и стабилизирующего кислорода. Трубки эллиптического сечения изогнуты по винтовой линии. Отношение большой оси эллипса к малой составляет 3–4, отношение площади сечения корпуса горелки к суммарной площади сечений всех эллиптических трубок — 4–10. Шаг винтовой линии составляет 1,0–1,6 м. Трубки подачи метанокислородной смеси расположены в корпусе двумя концентрическими рядами, наружным и внутренним, между трубками подачи стабилизирующего кислорода.

При работе по одним трубкам подаётся метанокислородная смесь, которая при этом закручивается, а по другим — стабилизирующий кислород.

Известная горелка имеет небольшой ресурс и недостаточно высокую производительность. Ресурс составляет 720–2160 ч из-за разрушения трубок подачи стабилизирующего кислорода в зоне сварных швов, соединяющих их с нижней плитой корпуса. Трубки разрушаются вследствие неодинакового теплового удлинения, обусловленного различием их длин.

Наиболее близким по технической сущности и достигаемому результату является прототип [2] — горелка для получения ацетилена методом термоокислительного пиролиза метана. Она содержит блочный газораспределитель с каналами подачи газовой смеси и каналами подачи стабилизирующего кислорода, соединёнными с кислородным коллектором. Горелка оснащена трубой подачи исходной газовой смеси, трубами подачи стабилизирующего кислорода и трубами подвода и отвода охлаждающей воды.

Блочное газораспределительное устройство состоит из трёх концентрически установленных цилиндрических блоков. В кольцевых каналах между ними расположены завихрители. В блоках находятся наружный и внутренний коллекторы подачи стабилизирующего кислорода и коллекторы циркуляции охлаждающей воды.

Верхняя часть газораспределительного устройства выполнена в виде конуса с прямолинейной образующей. Входные кромки газовых каналов, образованных кольцевыми пространствами, острые.

Во внутренних блоках находятся прямые и наклонные трубчатые каналы подачи стабилизирующего кислорода и каналы подачи охлаждающей воды. Завихрители наклонены под углом не более 45° и снабжены каналами для подачи кислорода и охлаждающей воды.

При работе метанокислородная смесь поступает по входной трубе, распределяется по кольцевым каналам, закручивается завихрителями и в виде закрученных потоков поступает в реакционную зону и зону горения. Стабилизирующий кислород поступает по входным трубам и через коллекторы и трубчатые каналы направляется в реакционную зону.

Охлаждающая вода поступает по входным трубам и коллекторам для охлаждения торца наружного блока, внутренних блоков и завихрителей [2].

Недостатки прототипа

1. Значительные газодинамические потери обусловлены характером течения при сужении на входе в завихрители и при обтекании центрального конического элемента. Поток, движущийся со скоростью ωс = 50 м/с, встречает на своём пути конус и меняет направление, следуя вдоль его образующей. Это приводит к следующим явлениям.

- Отрыв потока от образующей конуса.
- Образование вихревой зоны под куполом оторвавшегося потока.
- Частичная потеря кинетической энергии вследствие трения о поверхность конуса и перехода части кинетической энергии в потенциальную при торможении. Согласно расчёту, эти потери составляют 10–12 % исходной кинетической энергии потока.

Поток меняет направление, а его скорость снижается. Часть потока, удалённая от оси, входит в завихрители с углом конфузорности 180°. Это наиболее неблагоприятный переход газового потока.

Резкое изменение площади проходного сечения от подводящей трубы $F_p = 0{,}083$ м² до суммарной площади 12 каналов даёт следующее значение коэффициента конфузорности.

$$\sum_{i=1}^{12} F_{0i} = 0{,}03189 \text{ m}^2$$

$$K = \frac{F_p}{\sum_{i=1}^{12} F_{0i}} = 2{,}601$$

При входе газовой смеси в канал с острой кромкой поток по инерции отрывается от стенки вблизи входа. Отрыв и связанное с ним вихреобразование уменьшают поперечное сечение струи. Для прямого канала с острыми входными кромками коэффициент заполнения сечения определяется выражением

$$\varepsilon = \frac{F_c}{F_0}$$

где F_c — площадь струи, F_0 — площадь канала. При $Re > 10^4$ коэффициент заполнения ε равен 0,5. Коэффициент гидравлического сопротивления достигает ζ = 0,5 [3].

Зоны отрыва потока и резкое сужение под углом 180° приводят к неустойчивому турбулентному истечению газовой смеси из завихрителей. Эпюра скоростей в сечении завихрителя имеет пилообразную форму.

Таким образом, горелка-прототип имеет высокое гидравлическое сопротивление и пульсирующий, турбулентно неустойчивый поток на выходе из завихрителей. В журнале этот режим обозначен Re ~ Var. Это нарушает устойчивость горения смеси и снижает производительность по ацетилену.

2. Ресурс горелки-прототипа составляет всего 720–2160 ч из-за разрушения трубок стабилизирующего кислорода в зоне сварных швов, соединяющих их с нижней плитой. Разрушение трубок связано с концентрацией напряжений в зоне разрыва из-за неравномерного теплового удлинения завихрителей и кислородных трубок. Разность тепловых удлинений обусловлена различием длин этих элементов, что, по статье, подтверждается расчётом на прочность. В эксплуатации сварные швы разрушаются вследствие различного теплового удлинения завихрителей и трубок.

Расчёт теплового удлинения и напряжений

Таблица 1. Исходные данные для расчёта

Исходные данные	В завихрителях	В рубашке	В трубках
Температура рабочей среды, °C	650	35–60	30
Среда	$CH_4 + O_2$	H_2O	O_2
Материал	12Х18Н10Т	ХН32Т	ХН32Т

Для определения напряжений в области сварного шва условно принимаем, что каркас, включающий верхнюю и нижнюю плиты и обечайку, жёсткий. Термины, условные обозначения и механические свойства сплава ХН32Т, использованные при расчёте, приведены в таблице 2 [4].

Таблица 2. Исходные данные и результаты расчётов

Исходные данные	Значение
Модуль продольной упругости при расчётной температуре	$E = 2{,}05 \cdot 10^5$ МПа
Коэффициент линейного расширения при расчётной температуре	$K = 18{,}6 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1}
Предел прочности при расчётной температуре	$K = 18{,}6 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1}
Длина завихрителя	$L_1 = 0{,}166$ м
Длина трубки	$L_2 = 0{,}079$ м
Температура сборки	tc = 20 °C
Расчётная температура	tp = 650 °C

1. Тепловое удлинение завихрителей

$$\Delta L_1 = K(t_p - t_c)L_1 = 18{,}6 \cdot 10^{-6}(650 - 20) \cdot 0{,}166 = 0{,}00195 \text{ m}$$

2. Тепловое удлинение трубок подачи стабилизирующего кислорода

$$\Delta L_1 = K(t_p - t_c)L_2 = 18{,}6 \cdot 10^{-6}(650 - 20) \cdot 0{,}079 = 0{,}000926 \text{ m}$$

3. Разность тепловых удлинений

$$\Delta L_1 - \Delta L_2 = 0{,}00195 - 0{,}000926 = 0{,}001024 \text{ m}$$

В действительности конструкция горелки податлива. Экспериментально измеренная податливость нижней плиты и коллектора стабилизирующего кислорода составляет 0,87 мм = 0,00087 м. С учётом податливости разность тепловых удлинений составляет

$$\Delta L = 0{,}001024 - 0{,}000870 = 0{,}000154 \text{ m} = 1{,}54 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

Напряжение в трубках и сварном шве от тепловых деформаций записано в журнале следующим образом.

$$\sigma = \frac{\Delta L\, E}{L_2} = \frac{1{,}54 \cdot 10^{-4} \cdot 2{,}05 \cdot 10^5}{0{,}079} = 404{,}7 \text{ MPa} > 390 \text{ MPa}$$

В журнальном тексте указано напряжение 404,7 МПа. Из этого сделан вывод, что напряжение превышает предел прочности сварного соединения и приводит к потере работоспособности горелки [5, 6].

Задача и технический результат изобретения

В основу изобретения положена задача усовершенствовать горелку для получения ацетилена. Для этого изменены форма газораспределительного блока в целом, его верхняя часть, каналы подачи газовой смеси и стабилизирующего кислорода, коллектор подачи стабилизирующего кислорода, а также взаимное сопряжение этих элементов. Предложенная конструкция позволяет, по утверждению автора, добиться следующих результатов.

• Увеличить суммарную площадь газовых каналов с 0,03189 до 0,050 м², уменьшить коэффициент конфузорности с 2,601 до 1,66 и снизить потери исходной кинетической энергии газового потока.

• Снизить коэффициент гидравлического сопротивления с 0,50 до 0,12, то есть в 4,17 раза.

• Устранить тепловые напряжения, которые в прототипе и аналоге [1] приводят к разрушению трубок подачи кислорода и потере работоспособности горелки.

• Обеспечить устойчивое турбулентное течение газа в каналах, обозначенное в статье как Re = const. Скорость в поперечном сечении канала монотонно возрастает от стенки к оси потока.

• Обеспечить устойчивое горение газовой смеси.

• Повысить производительность горелки по ацетилену.

• Существенно увеличить ресурс горелки за счёт устранения указанного механизма тепловых напряжений. Выполнение газораспределителя в виде единого блока и замена кислородных трубок каналами, образованными сверлением и расточкой, устраняют различие длин отдельных элементов, подверженных тепловому удлинению. Тем самым устраняется причина возникновения напряжений, разрушающих кислородные трубки в двух описанных горелках.

Устройство предлагаемой горелки и газодинамический расчёт

В горелке для термоокислительного пиролиза метана, содержащей блочное газораспределительное устройство с каналами газовой смеси и каналами стабилизирующего кислорода, соединёнными с кислородным коллектором, поставленная задача решается изменением конструкции газораспределителя. Он выполнен как единый направляющий и распределительный блок. Каналы подачи смеси, стабилизирующего кислорода и кислородный коллектор выфрезерованы непосредственно в моноблоке. Верхняя часть блока имеет вид конуса с циклоидальной образующей, названной в статье брахистохроной. Входы в газовые каналы выполнены как плавно сужающиеся участки с переходом от трапецеидального сечения к трапецеидальному под углом α = 40–60°.

Технический результат изобретения заключается в существенном увеличении ресурса и производительности горелки.

Предлагаемая горелка представляет собой моноблок, одновременно направляющий и распределяющий газовую смесь и стабилизирующий кислород по отдельным каналам в реакционную зону и зону горения.

В моноблоке цельно выфрезерованы каналы подачи газовой смеси и каналы подачи стабилизирующего кислорода. Последние соединены с цельно выфрезерованным кислородным коллектором.

Для уменьшения лобового сопротивления газового потока верхняя часть моноблока имеет форму конуса с циклоидальной образующей. Её строят по расчётным точкам циклоиды с последующей интерполяцией с шагом по оси X 0,01 мм. Это позволяет получить плавную кривую с малыми значениями лобового сопротивления.

Плавно сужающиеся входы в каналы сохраняют трапецеидальную форму сечения. Угол сужения составляет 40–60°. Суммарная проходная площадь каналов увеличивается с 0,03189 до 0,050 м².

$$\sum_{i=1}^{12} F_{0i} = 0{,}050\ \text{м}^2$$

Площадь проходного сечения подводящей трубы остаётся такой же, как у прототипа, F_p = 0,083 м². Коэффициент конфузорности снижается с 2,601 до 1,66.

$$K = \frac{F_p}{\sum_{i=1}^{12} F_{0i}} = 1{,}66$$

Сужающийся участок канала представляет собой плавный коллектор, очерченный дугой лемнискаты. В сочетании с выбранным углом сужения это позволяет значительно снизить коэффициент сопротивления. Для предлагаемой конструкции в журнале приведена следующая интегральная формула.

$$\zeta = \frac{\frac{1}{F_0}\int (\rho_0 - \rho_0')\,\omega\,\mathrm{d}F}{\frac{\rho_0 \omega_0^3}{2} F_0}$$

В пояснении к формуле ρ_0 и ρ'_0 обозначают полные давления перед коллектором и на выходе из него. Величина ω_0 — скорость в подводящей трубе, ω — скорость в газовом канале, F_0 — площадь сечения канала.

Решая это уравнение для рассматриваемой конструкции, автор получил коэффициент гидравлического сопротивления ζ = 0,12, что в 4,17 раза меньше, чем у прототипа. Устойчивый турбулентный характер течения в газовых каналах показан на рис. 6. Эпюра скоростей в поперечном сечении газового канала монотонно возрастает от стенки к оси потока.

Предлагаемая конструкция поясняется чертежами на рис. 1–6. На рис. 1 и 2 показаны виды горелки спереди и сверху. На рис. 3 приведён продольный разрез горелки в водяной охлаждающей рубашке, соединённой с трубопроводами подачи стабилизирующего кислорода. На рис. 4 показан вид А на рис. 3 сверху, на рис. 5 — вид Б на рис. 3 снизу. На рис. 6 показан характер течения газовой смеси в горелке.

Детали и работа горелки

На рис. 7 показана фотография горелки в сборе со смесителем, на рис. 8 — моноблок форсунок горелки.

Горелка, показанная на рис. 1–6, включает следующие элементы.

- Газораспределительный моноблок 1, направляющий и распределяющий газовую смесь и стабилизирующий кислород по отдельным каналам в реакционную зону и зону горения.
- Каналы 2 для подачи газовой смеси и каналы 3 для подачи стабилизирующего кислорода, цельно выфрезерованные в моноблоке 1.

• Цельно выфрезерованный коллектор подачи стабилизирующего кислорода, состоящий из трёх участков — центрального 4, внутреннего 5 и наружного 6.

Верхняя часть 7 газораспределительного моноблока 1 выполнена в виде конуса с циклоидальной образующей (рис. 1–3). Входы в газовые каналы 2 представляют собой плавно сужающиеся участки с трапецеидальным сечением и углом сужения α = 40–60°. Кислородные каналы 3 включают центральный, прямые и наклонные каналы (рис. 1, 3).

На рис. 3–6 также показаны следующие элементы.

• Вход 8 стабилизирующего кислорода в центральный 4, внутренний 5 и наружный 6 коллекторы.

• Выход 9 стабилизирующего кислорода из центрального канала 3.

• Выход 10 стабилизирующего кислорода из прямых каналов 3 внутреннего коллектора.

• Выход 11 стабилизирующего кислорода из наклонных каналов.

• Вход 12 умягчённой воды для охлаждения горелки.

• Выход 13 умягчённой воды после охлаждения горелки.

Газораспределительный моноблок 1 установлен в водяной охлаждающей рубашке 14. Перед работой горелки в рубашку 14 подают умягчённую воду.

При работе в каналы 2 подают метанокислородную смесь. Через центральный 4, внутренний 5 и наружный 6 коллекторы в каналы 3 подают стабилизирующий кислород. Метанокислородная смесь и стабилизирующий кислород поступают по своим каналам в реакционную зону и зону горения. Ацетилен и другие продукты горения из реакционной зоны направляют в систему выделения ацетилена.

Источники статьи

1. Авторское свидетельство СССР № 488793. МПК C07C 11/24, C07C 3/28, F23D 13/40. Опубликовано 25.02.1976.

2. Авторское свидетельство СССР № 292364. МПК B01J 1/00. Прототип. Дата в журнальном списке — 08.06.1978.

3. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. Москва, Машиностроение, 1992. Глава 3-1-3, с. 114.

4. Марочник сталей и сплавов / А. С. Зубченко. Москва, Машиностроение, 2003.

5. ГОСТ 5632-7. Стали высоколегированные и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки.

6. ГОСТ Р 52857.1-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчёта на прочность. Общие требования.

Чертежи горелки

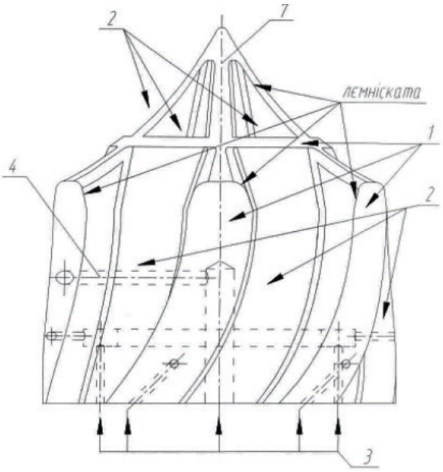


Рис. 1. Горелка, вид спереди

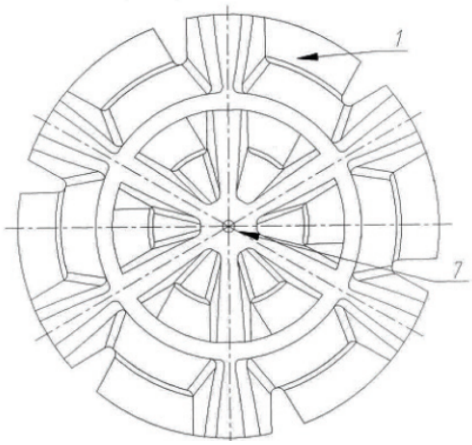


Рис. 2. Горелка, вид сверху

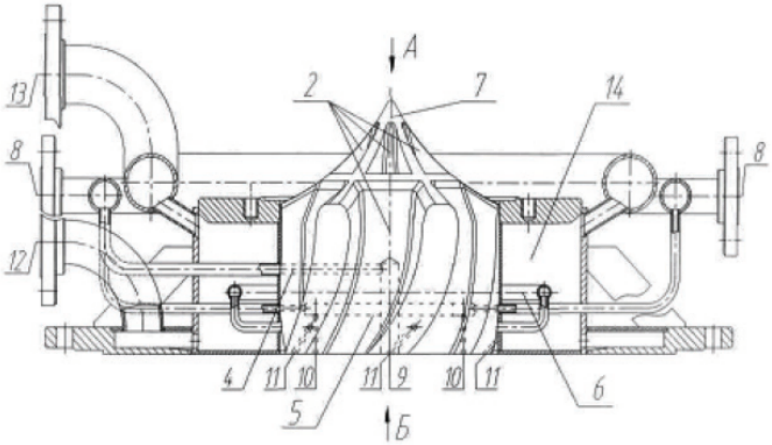


Рис. 3. Продольный разрез горелки

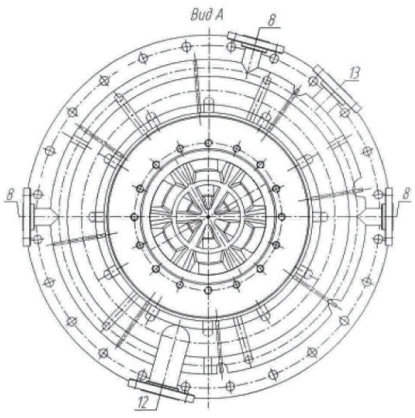


Рис. 4. Вид А (рис. 3) сверху

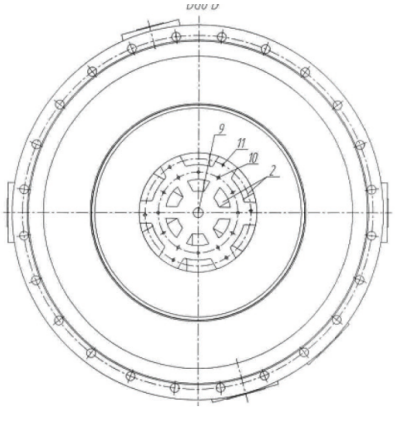


Рис. 5. Вид Б (рис. 3) снизу

Движение смеси и фотографии горелки

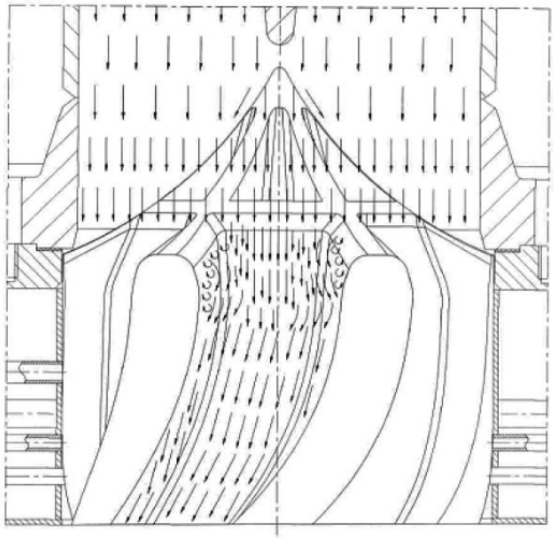


Рис. 6. Характер потока газовой смеси в горелке



Рис. 7. Горелка в сборе со смесителем

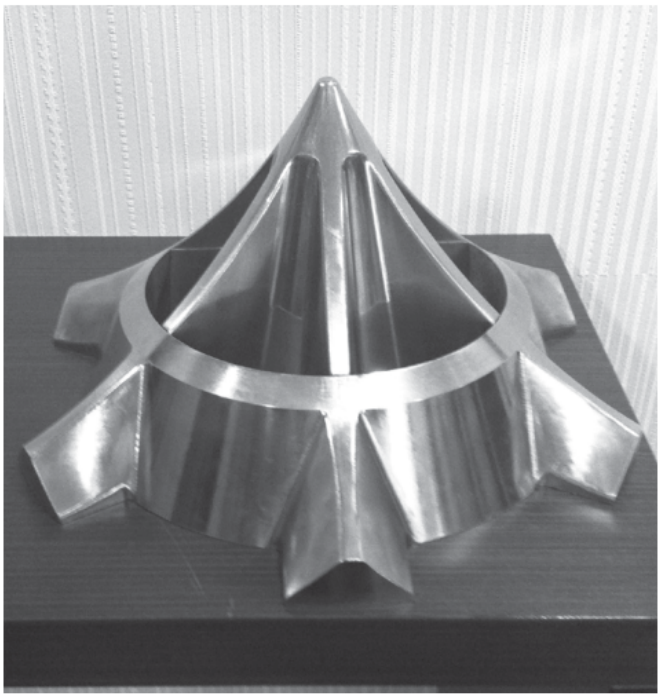


Рис. 8. Моноблок форсунок горелки