

УДК 662.76.032

**ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ
СИНТЕЗ-ГАЗА ДЛЯ МАЛОТОННАЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА
МЕТАНОЛА**

**DESIGN FEATURES OF SYNGAS GAS GENERATORS
FOR LOW-TONNAGE METHANOL PRODUCTION**

А.М. Кузьмин, К.В. Кулаков, С.В. Кулаков, С.Н. Ценева

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»

им. Д.Ф. Устинова,

ООО «ГСГ»,

г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Aleksey M. Kuzmin, Kirill V. Kulakov, Saveliy V. Kulakov,

Sofia N. Tseneva

Baltic State Technical University,

GSG LLC,

Saint-Petersburg, Russian Federation

Аннотация. Изложены подходы к конструированию малоразмерных газогенераторов синтез-газа (ГСГ), входящих в состав комплексов получения синтез-газа для малотоннажного производства метанола. ГСГ представляют сборно-сварную конструкцию, включающую следующие основные узлы: смесительную головку, камеру сгорания, узел впрыска, испарительную камеру. Особое внимание уделено рассмотрению конструкций смесительной головки, являющейся наиболее теплонагруженным узлом ГСГ с рабочей температурой вплоть до 2000 °С, что обуславливает повышенные требования к ее жаропрочности и термостойкости. Приведено описание оригинальных конструкционных

решений в виде компенсационных колец и быстроразъемных соединений, обеспечивающих повышение надежности, ремонтпригодности и снижение массогабаритных характеристик ГСГ.

Abstract. Approaches of the design of small-size syngas gas generator (SGG) which is a part of syngas production plant for low-tonnage methanol production are described. SGG is a prefabricated-welded block that includes the following main parts – a mixing head, a combustion chamber, an injection unit, and an evaporation chamber. Special attention is paid to the design of the mixing head which is the most heat-loaded part with an operating temperature of up to 2000 °C, which leads to increased requirements for its heat resistance and thermal stability. The original design solutions in the form of compensation rings and quick-release joints which provide an increase in reliability, maintainability and a reduction in the weight and size characteristics of the SGG are described.

Ключевые слова: газогенератор синтез-газа; малотоннажное производство метанола; технология сборки; смесительная головка; камера сгорания; узел впрыска; испарительная камера

Keywords: syngas gas generator; low-tonnage methanol production; assembly technology; mixing head; combustion chamber; injection unit; evaporation chamber

Введение

Актуальность создания малотоннажного производства метанола, используемого преимущественно в качестве ингибитора гидратообразования на удаленных нефтяных и газовых месторождениях, в том числе на морских платформах, подтверждается многочисленными литературными источниками и опытно-конструкторскими разработками установок по производству метанола мощностью 800–60000 т/год,

осуществленными компаниями BP, Davy Process, Syntroleum, PetroSa, Lurgi&Statoil, Eni IFP/Axens, Conoco-Philips [1]. Существующие технологии синтеза метанола приспособлены исключительно под крупнотоннажное производство [2–5].

В настоящее время в России производится более 4,5 млн т метанола в год, из которых свыше 500 тыс. т используют в качестве ингибитора гидратообразования при транспортировке и добыче нефтегазового сырья. Единственное малотоннажное производство метанола принадлежит ОАО «НОВАТЭК» и расположено на Юрхаровском нефтегазоконденсатном месторождении (НГКМ), однако возможность создания двух подобных установок обусловлена наличием всей необходимой для реализации традиционной технологии синтеза инженерной инфраструктуры [6]. Поэтому несмотря на существование крупных центров производства метанола в РФ существует острая необходимость создания малотоннажных установок, которые размещались бы непосредственно в местах нефте- и газодобычи. Учитывая отдаленность месторождений от крупнотоннажных производств, стоимость доставки увеличивает стоимость метанола в 2–3 раза. Также при транспортировке существуют экологические риски, связанные с аварийным разливом метанола. Кроме того, создание мобильных комплексов позволит обеспечить снижение выбросов и предотвратить сжигание попутных нефтяных газов [7].

Исходным сырьем для производства метанола является синтез-газ (СГ), представляющий собой смесь оксида углерода и водорода, а также диоксида углерода, паров воды и других компонентов. На сегодняшний день более 75 % СГ производится путем парового риформинга природного газа с последующей каталитической конверсией СГ в метанол. Известно также, что примерно 70 % капитальных затрат при производстве метанола приходится на комплекс подготовки СГ. Это обуславливает целесообразность разработки новых технологий производства СГ, позволяющих снизить капитальные затраты. Одним из перспективных

направлений является производство СГ на основе некаталитического парциального окисления природного газа, в том числе в ГСГ [8–16].

В Российской Федерации теоретические и экспериментальные исследования процесса парциального окисления сырья в газогенераторах по типу жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) проводились в НПО «Энергомаш» им. В.П. Глушко, ИНХС РАН им. А.В. Топчиева, НИФХИ им. Л.Я. Карпова, ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша». Научные работы в данном направлении активно ведутся компаниями ООО «ВТР» и ООО «ГСГ», Санкт-Петербург, в БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова на кафедре «Двигатели и энергоустановки летательных аппаратов» [6, 17–21].

Цель данной публикации – продемонстрировать проектные и конструкторские решения при создании инновационного ГСГ, обладающего повышенными эксплуатационными характеристиками и входящего в состав малотоннажной установки производства метанола производительностью 5 тысяч тонн в год.

Укрупненная блок-схема синтеза метанола приведена на рисунке 1. Основными узлами установки являются: блок подачи компонентов, ГСГ, блок подготовки СГ, блок синтеза метанола.

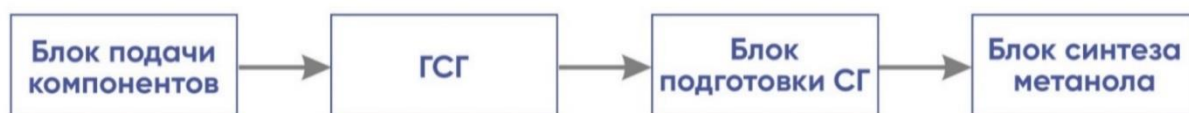


Рисунок 1. Блок-схема комплекса синтеза метанола

Блок подачи компонентов обеспечивает предварительную подготовку исходных компонентов: окислителя – атмосферного воздуха, углеводородного горючего – подготовленного природного газа, балластного компонента – водяного пара. Процентное содержание водяного пара в смеси с природным газом – 15 % масс., такое соотношение выбрано согласно рекомендациям [6]. Массовые расходы компонентов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Массовые расходы компонентов

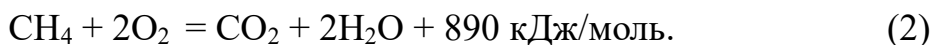
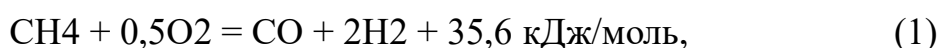
Компонент	Массовый расход, кг/с
Атмосферный воздух	1,159
Подготовленный природный газ	0,174
Водяной пар	0,026

При формировании облика ГСГ необходимо учитывать основные требования как ко всей установке, так и к ее отдельным узлам:

- 1) максимальный уровень конверсии углеводородного сырья;
- 2) высокий уровень надежности;
- 3) минимальные массогабаритные характеристики;
- 4) удобство в эксплуатации, транспортировке и обслуживании;
- 5) минимальная стоимость комплекса;
- 6) высокая степень интеграции с существующей инфраструктурой: источниками сырья, энергоресурсами, инженерными сетями;
- 7) ремонтпригодность;
- 8) пожаро- и взрывобезопасность;
- 9) экологичность.

В данной работе последовательно рассмотрены особенности конструирования, сборки и компоновки узлов ГСГ с учетом изложенных требований.

Получение СГ из природного газа описывается следующими брутто-уравнениями [22]



Внутрикамерные процессы, протекающие в ГСГ, схожи с процессами в камерах жидкостных ракетных двигателей [6, 7]. Проведенные исследования показали [23, 24], что использование методов расчета ГСГ, подобных применяемым для расчетов ЖРД, позволяет добиваться минимальных массогабаритных характеристик ГСГ.

Особенности конструкции ГСГ

ГСГ представляет собой блочно-модульную конструкцию, представленную на рисунке 2. В состав ГСГ входят следующие основные узлы:

- 1) смесительная головка (СМГ);
- 2) камера сгорания (КС);
- 3) узел впрыска (УВ);
- 4) испарительная камера (ИК).

Для определения основных конструктивных параметров узлов ГСГ были проведены расчёты на основе методики проектирования, описанной в [25].

В качестве исходных данных для расчета использовались значения массовых расходов компонентов, указанных в таблице 1, давление в камере сгорания ГСГ – 6,0 МПа.

Смесительная головка предназначена для подачи и смешения компонентов. Она представляет собой сборно-сварную конструкцию, основным элементом которой является двухкомпонентная форсунка. СМГ должна обеспечивать равномерное распределение компонентов по сечению камеры сгорания. В процессе проектирования двухкомпонентной форсунки рассматривались различные варианты конструкторско-технологических решений. По итогам моделирования процессов в смесительной головке и процессов, протекающих в камере сгорания ГСГ, были подобраны геометрические параметры форсунок смесительной головки, представленные в таблице 2.

Таблица 2. Геометрические параметры форсунки

Параметр	Значение
Диаметр сопла смесительного элемента, м	0,037
Высота смесительного элемента, м	0,045
Количество входных отверстий форсунки окислителя, шт.	6
Диаметр входного отверстия форсунки окислителя, м	0,006
Количество входных отверстий форсунки горючего, шт.	8
Диаметр входного отверстия форсунки горючего, м	0,0029

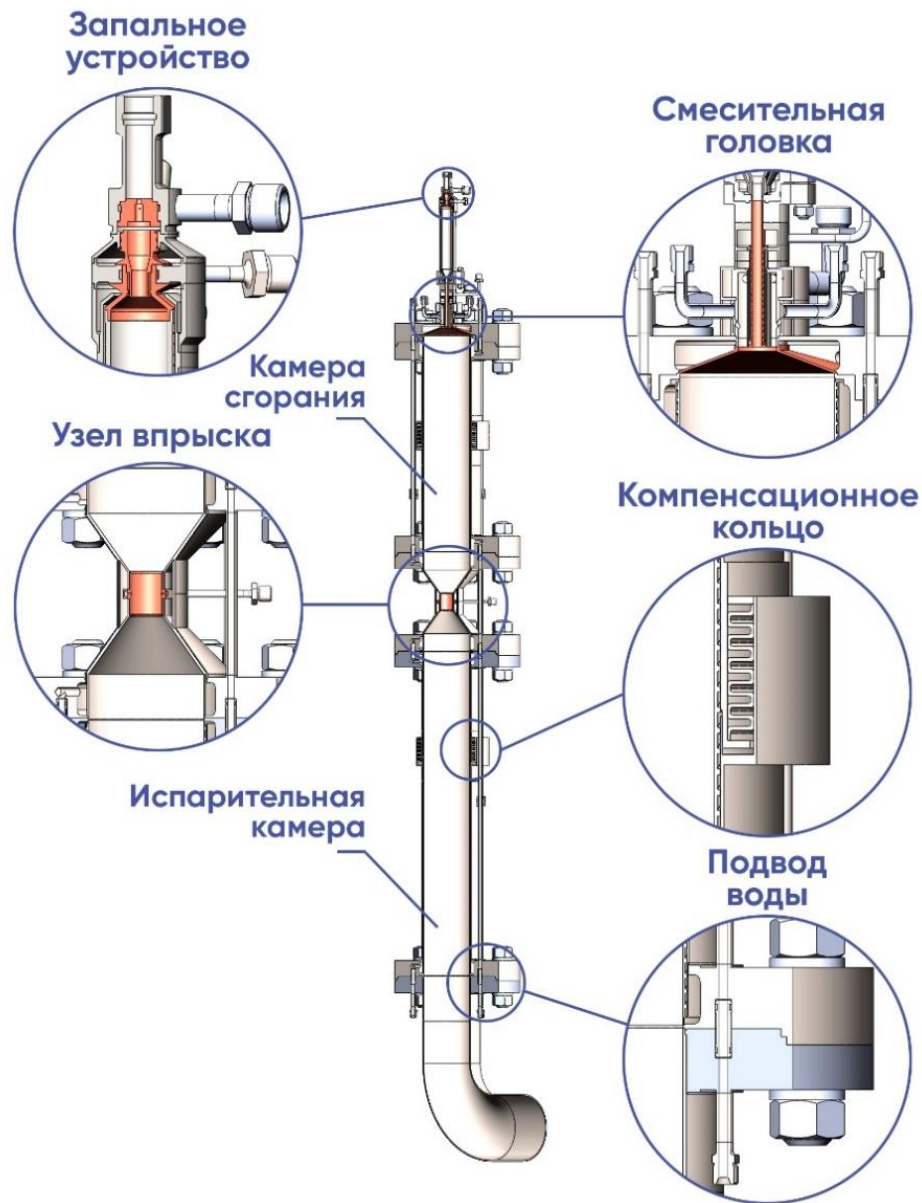


Рисунок 2. Конструкция ГСГ

В разработанной форсунке воздух поступает через тангенциальные отверстия, что обеспечивает закрутку потока. Газ подается в поток закрученного воздуха через отверстия, расположенные под углом 45° к оси форсунки. Схема СМГ представлена на рисунке 3.

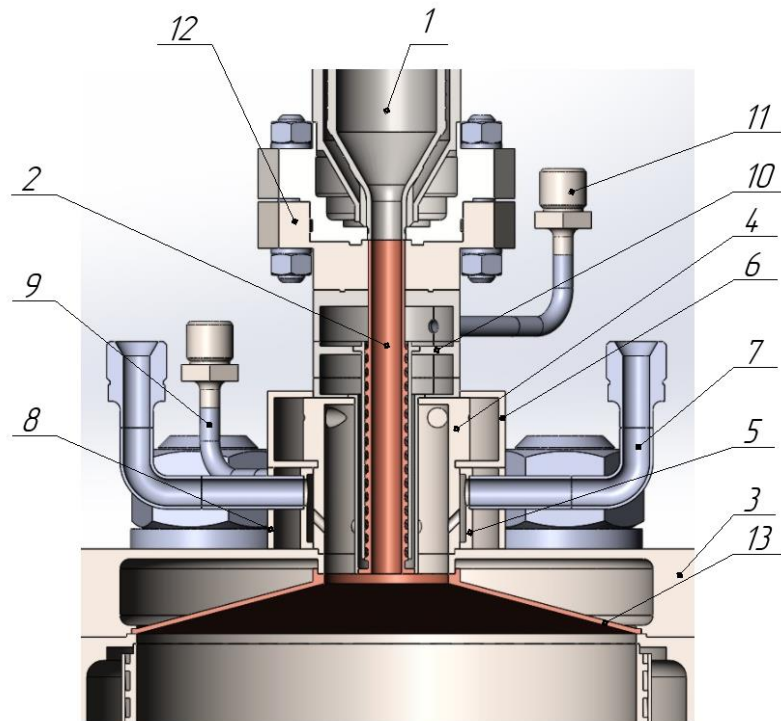


Рисунок 3. Смесительная головка ГСГ

Так как компоненты несамовоспламеняющиеся, поджог смеси осуществляют с помощью запального устройства (1). Высокотемпературный поток продуктов сгорания поступает из запального устройства через специальную втулку (2), охлаждаемую водой. Для улучшения процессов зажигания, смешения и внутрикамерных процессов осуществляют предварительный нагрев компонентов (воздуха – до температуры 250 °С, природного газа – до 450–550 °С), благодаря чему достигается устойчивость горения и профилактика сажеобразования в КС.

Сборка СМГ – трудоемкий процесс. На первом этапе устанавливают и закрепляют фланец (3), к которому приваривают форсунку (4). Далее устанавливают два полукольца (5), которые являются составными частями коллектора горючего, и приваривают как к самому фланцу, так и к коллектору окислителя (6). Конструкция коллектора подвода окислителя аналогична конструкции коллектора горючего газа. Газ подают с помощью двух патрубков (7). Для предотвращения чрезмерного нагрева фланца и форсунки предусмотрен коллектор (8), в который подают воду для

охлаждения элементов конструкции. Коллектор представляет собой сборную конструкцию, состоящую из двух полуколец, которые обжимают два патрубка подвода горючего. Вода подается в полость и отводится через патрубки (9).

Для обеспечения охлаждения втулки запального устройства предусмотрен двухуровневый коллектор воды (10), представляющий сборную конструкцию. Для облегчения сборки коллектор состоит из шести элементов, которые свариваются между собой. Через нижний уровень коллектора вода по щелевому каналу поступает к нижней части втулки, а затем через фрезерованный винтовой канал движется вверх в противоток истекающим продуктом сгорания. Далее вода отводится через патрубок (11). На коллектор устанавливается фланец запального устройства (12) и приваривается. На этот фланец с помощью шпилечного соединения устанавливается само запальное устройство. При проектировании входных и выходных коллекторов требуется обеспечивать равенство проходных сечений.

Таким образом, удастся избежать «запирания потока» при переходе из одной полости в другую. Во фланец СМГ устанавливают медное огневое днище (13), охлаждаемое водой. При разработке СМГ требуется обеспечить возможность проведения сварочных работ аргонодуговой сваркой в среде инертных газов.

Камера сгорания предназначена для смешения, горения компонентов и представляет собой цилиндрическую конструкцию. Диаметр и длина КС должны обеспечивать полноту процесса парциального окисления в объеме КС, получение качественного СГ и снижение массогабаритных характеристик ГСГ.

В результате расчётов получены габаритные характеристики ГСГ, приведенные в таблице 3.

Таблица 3. Основные геометрические размеры ГСГ

Геометрический размер	Значение
Длина камеры сгорания, м	0,5
Диаметр камеры сгорания, м	0,15
Длина испарительной камеры, м	0,75
Диаметр испарительной камеры, м	0,15

КС условно можно разделить на 3 зоны: зону смешения (I), зону горения (II) и зону полного смешения компонентов (III). Примерное расположение этих зон приведено на рисунке 4.

КС состоит из двух оболочек – внутренней (14) и внешней (15). Внутренняя оболочка является температуронапряженным элементом конструкции, ее охлаждение осуществляется деминерализованной водой, протекающей в межрубашечном пространстве (между внутренней и внешней оболочкой) по фрезерованным каналам. Геометрия каналов обеспечивает надежное охлаждение и минимально возможные гидравлические сопротивления.

Между внутренней и внешней стенками КС температурный перепад может достигать значений в 900 °С [26].

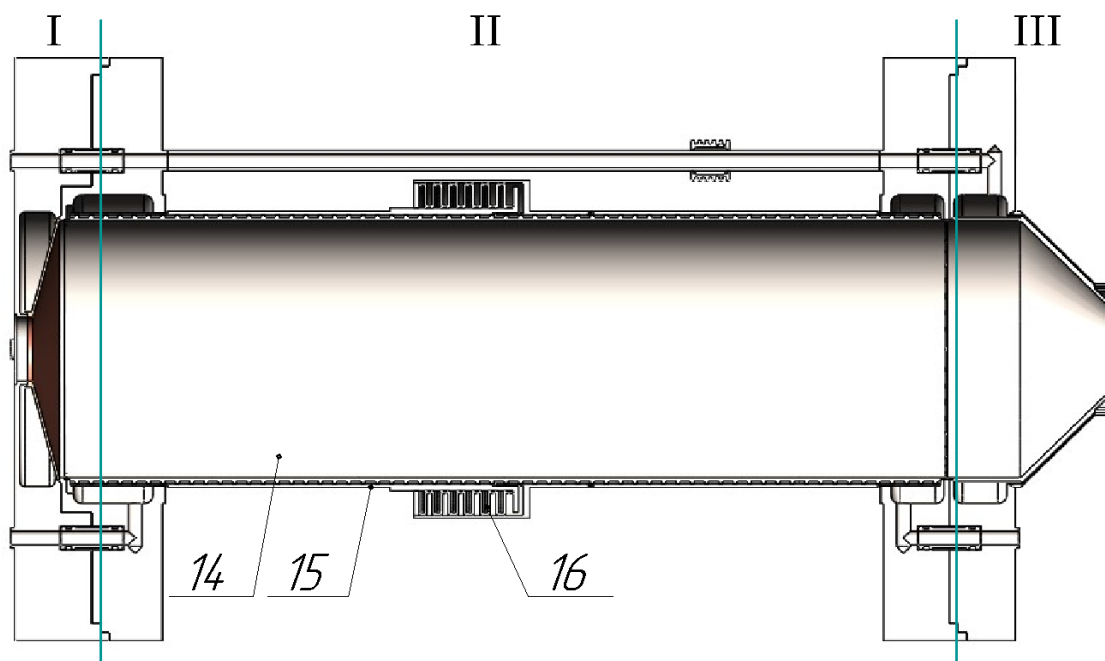


Рисунок 4. Условное разделение КС на зоны

Такой высокий температурный градиент отрицательно сказывается на надежности конструкции, поскольку в стенках возникают высокие напряжения, что приводит к изменению геометрических размеров КС и может привести к прогару стенок. Для повышения надежности конструкции предложено использовать специальные компенсационные кольца (16), что позволяет избежать деформации КС. Надежная компенсация деформации оболочек может быть обеспечена установкой компенсационного кольца на расстоянии 0,2 м от огневого днища [26].

Узел впрыска. Через УВ осуществляется подача воды в продукты сгорания истекающих из КС газов для снижения температуры потока до требуемой для дальнейшего технологического процесса. Подача воды осуществляется через радиальные отверстия, расположенные на боковой поверхности, из коллектора (17), в который вода подается через два патрубка (18). Конструкция УВ приведена на рисунке 5.

Охлаждение УВ осуществляется водой, которая проходит по щелевому каналу. Для упрощения сборки и обеспечения жесткости конструкции на внутреннем конусе УВ сделаны ребра жесткости. Это позволяет произвести центровку внешней и внутренней стенок камеры. Для обеспечения температурной стойкости внутреннее кольцо узла впрыска изготавливают из меди. Для подачи воды в УВ используются 4 струйные форсунки, диаметр которых составляет 0,0017 м.

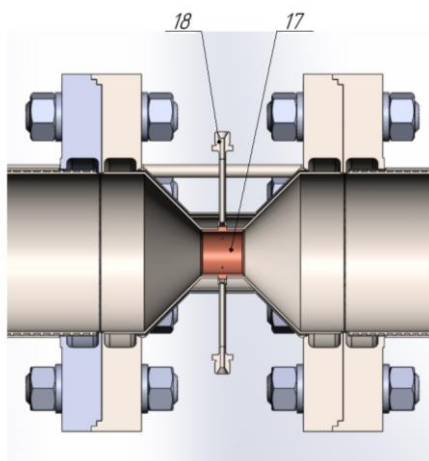


Рисунок 5. Конструкция узла впрыска

Испарительная камера представляет цилиндрическую двухоболочечную конструкцию. Она обеспечивает качественное перемешивание продуктов сгорания и воды, гомогенность химического состава по сечению и однородность температурного профиля продуктов сгорания. Охлаждение ИК осуществляется аналогично охлаждению КС. Для компенсации температурных деформаций на ИК также предусмотрено компенсационное кольцо.

Сборка ГСГ. Элементы спроектированного ГСГ требуют последовательной сборки. В отличие от традиционно используемых болтовых соединений в инновационной конструкции ГСГ применяют быстросъемные мультисоединения (БРМ) [27].

Охлаждение узлов ГСГ осуществляется водой. Классические схемы подачи хладагента предусматривали установку приварных коллекторов и патрубков, к которым привариваются штуцеры с резьбой или фитинги. Постоянная эксплуатация агрегата приводит к нарушению герметичности резьбы, а сами штуцеры и фитинги окисляются и ржавеют, что приводит к выходу их из строя. Демонтаж и замена этих элементов является сложной задачей и требует больших затрат времени. Применение БРМ позволяет не использовать приварные патрубки и коллекторы для подачи хладагента. Конструкция с БРМ представлена на рисунке 6.

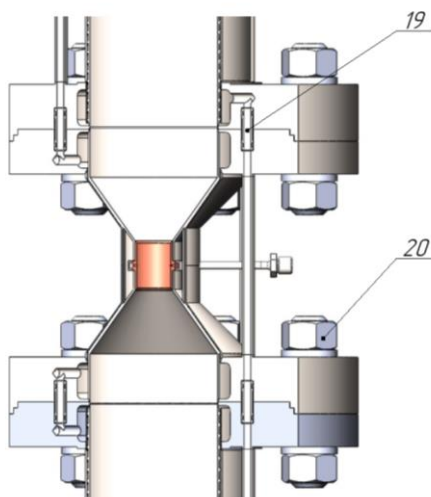


Рисунок 6. Иллюстрация применения БРМ

Вода поступает в межрубашечное пространство КС и ИК через каналы во фланцах. Во фланцах сделаны специальные отверстия для установки фитингов (19). Герметичность такого соединения достигается использованием уплотнительных колец, устанавливаемых в пазы фитингов.

Особенностью конструкции является то, что каналы, по которым проходит хладагент, изготовлены в самом фланце. Нестандартная технологическая задача – изготовление отверстия, расположенного перпендикулярно оси камеры ГСГ. Способы изготовления такого отверстия отличаются в зависимости от диаметра камеры ГСГ. Если диаметр камеры ГСГ составляет менее 300 мм, то отверстие во фланце изготавливают на стадии литья, если же диаметр камеры более 300 мм, то целесообразна токарная обработка.

Сборка ГСГ осуществляется последовательным соединением блоков ГСГ: смесительной головки, камеры сгорания, узла впрыска, испарительной камеры и блока подвода хладагента. Для крепления фланцев друг с другом используют шпилечное соединение (20) в соответствии с ГОСТ для заданного рабочего давления в полостях продуктов сгорания. Во фланцах сделана посадочная проточка для установки прокладки.

Использование БРМ позволяет: создать блочно-модульную конструкцию без применения сильфонных шлангов для подачи воды, воду подают через жесткие трубки, оси которых коллинеарны с осью ГСГ; в случае необходимости оперативно заменять отдельные узлы ГСГ, повышая тем самым ремонтпригодность агрегата; изменять характеристики ГСГ, меняя длину КС или ИК. Для подачи и отвода хладагента используют трубы, жестко соединенные с фланцами, что позволяет минимизировать габаритные характеристики ГСГ.

Выводы

Рассмотрены технические решения по совершенствованию основных узлов ГСГ, предназначенного для получения синтез-газа на основе

парциального окисления природного газа в малотонножных установках производства метанола.

Разработана конструкция СМГ, позволяющая добиться требуемого фронта пламени и равномерного распределения компонентов по сечению камеры сгорания.

В КС и ИК для предотвращения температурных деформаций предложено использовать специальные компенсационные кольца, что повышает надежность ГСГ. Применение предложенных быстроразъемных соединений позволяет отказаться от использования сильфонных шлангов, что повышает удобство эксплуатации агрегата.

Конструкция УВ позволяет надежно регулировать температуру истекающего из ГСГ газового потока. Разработана технология сборки узлов, повышающая технологичность процесса и ремонтпригодность ГСГ.

Перечисленные усовершенствования конструкции и технологии сборки обеспечивают модульность, надежность, ремонтпригодность и малые массогабаритные характеристики инновационного ГСГ, возможность его установки в стандартных транспортабельных контейнерах для использования в составе малотоннажных установок по производству метанола в промышленных условиях.

Список используемых источников

1. Бахтизина Н.В. Вовлечение в разработку не востребуемых ресурсов российского газа с применением технологии GTL // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2013. Т. 9. № 8 (197). С. 24-28.

2. Арутюнов В.С., Савченко В.И., Седов И.В., Макарян И.А., Шмелев В.М., Алдошин С.М. Новые концепции развития малотоннажной газохимии // НефтеГазоХимия. 2014. № 4. С. 19-23.

3. Савченко В.И., Макарян И.А., Фокин И.Г., Седов И.В., Магомедов Р.Н., Липилин М.Г., Арутюнов В.С. Малотоннажные GTL-процессы на базе прямого парциального окисления углеводородных газов без стадии получения синтез-газа // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. 2013. № 8. С. 21-26.

4. Фокин И.Г., Савченко В.И., Арутюнов В.С. Парциальное газофазное окисление углеводородных газов с регулируемым соотношением метанола и монооксида углерода в продуктах окисления // Химическая физика. 2014. Т. 33. № 4. С. 22-26. DOI: 10.7868/S0207401X14040037.

5. Арутюнов В.С., Савченко В.И., Седов И.В. О перспективах промышленных газохимических технологий на основе азотсодержащего синтез-газа // НефтеГазоХимия. 2016. № 4. С. 14-23.

6. Загашвили Ю.В., Ефремов В.Н., Кузьмин А.М., Лищинер И.И. Комплекс получения синтез-газа для малотоннажного производства метанола // НефтеГазоХимия. 2017. № 1. С. 19-26.

7. Загашвили Ю.В., Кузьмин А.М. Оптимизация состава синтез-газа для малотоннажного производства метанола // НефтеГазоХимия. 2018. № 3. С. 39-43. DOI: 10.24411/2310-8266-2018-10303.

8. Чайка С.Е., Шкода А.М. Малотоннажные GTL-установки // NewChemistry. URL: http://www.newchemistry.ru/printletter.php?n_id=6615 (дата обращения: 07.04.2021).

9. Шаповалова А. Краткий обзор российского рынка метанола по итогам 2019 года // Refinitiv. URL: www.refinitiv.ru/blog/market-insights/kratkij-obzor-rossijskogo-rynka-metanola-po-itogam-2019/ (дата обращения: 07.04.2021).

10. Метанол 2019 // Creon Conferences. URL: <http://www.creon-conferences.com/consulting/detailConf.php?ID=126542> (дата обращения: 08.04.2021).

11. Грунвальд А.В. Рост потребления метанола в газовой промышленности России и геоэкологические риски, возникающие при его использовании в качестве ингибитора гидратообразования // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2007. № 2. С. 27. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Grunvald/Grunvald_2.pdf (дата обращения: 09.04.2021).

12. Махмутов Р.А. Оптимизация технологии малотоннажного процесса синтеза метанола на месторождениях крайнего севера: дис. ... канд. тех. наук. Уфа, 2013. 120 с.

13. Юнусов Р.Р., Шевкунов С.Н. Метанольный проект «НОВАТЭКА» // NewChemistry. URL: https://www.newchemistry.ru/printletter.php?n_id=5504 (дата обращения: 10.04.2021).

14. Lishchiner I.I., Malova O.V., Tarasov A.L., Maslennikov V.M., Vyskubenko Y.A., Tolchinskii L.S., Dolinskii Y.L. Synthesizing Methanol from Nitrogen-Ballasted Syngas // Catalysis in Industry. 2010. Vol. 2. P. 368-373. DOI: 10.1134/S2070050410040112.

15. Indarto A., Palguandi J. Syngas: Production, Applications, and Environmental Impact. New York: Nova Science Publishers Inc, 2013. 365 p.

16. Li Q., Wang T., Liu Y., Wang D. Experimental Study and Kinetics Modeling of Partial Oxidation Reactions in Heavily Sooting Laminar Premixed Methane Flames // Chemical Engineering Journal. 2012. Vol. 207-208. P. 235-244. DOI: 10.1016/j.cej.2012.06.093.

17. Пат. 2310600 РФ, МПК С 01 В 3/34. Высокопроизводительный генератор синтез-газа / В.Б. Кубиков, А.В. Егоров, О.А. Грабин, Ю.С. Ершов. 2005128337/15, Заявлено 13.09.2005; Оpubл. 20.11.2007. Бюл. 32.

18. Пат. 2320531 РФ, МПК С 01 В 3/36. Способ получения синтез-газа при горении и устройство для его осуществления / И.В. Билера, Ю.А. Колбановский, С.К. Петров, Н.А. Платэ, И.В. Россихин. 2006115006/15, Заявлено 04.05.2006; Оpubл. 27.03.2008. Бюл. 9.

19. Пат. 2392297 РФ, МПК С 10 J 3/34. Реактор для получения синтез-газа / Ю.Н. Филимонов, Н.С. Прохоров, М.С. Ченцов, Г.Б. Савченко, В.С. Соколов. 2008151301/15, Заявлено 23.12.2008; Оpubл. 20.06.2010. Бюл. 17.

20. Пат. 2408417 РФ, МПК В 01 J 7/00. Генератор синтез-газа / А.А. Коротеев, Г.К. Коровин, И.Г. Лозино-Лозинская, Б.А. Воробьев, Н.В. Осколков, Р.Л. Шигин. 2009121294/05, Заявлено 04.06.2009; Оpubл. 10.01.2011. Бюл. 1.

21. Пат. 2523824 РФ, МПК С 01 В 3/32. Устройство для получения синтез-газа / Ю.Н. Филимонов, Ю.В. Анискевич, В.В. Красник, Ю.В. Загашвили, А.А. Галаджун. 2012130048/05, Заявлено 06.07.2012. Оpubл. 27.07.2014. Бюл. 21.

22. Мордокович В.З., Синева Л.В., Кульчаковская Е.В. Четыре поколения технологии получения синтетического жидкого топлива на основе синтеза Фишера-Тропша. Исторический обзор // Катализ в промышленности. 2015. № 5. С. 23-45. DOI: 10.18412/1816-0387-2015-5-23-45.

23. Загашвили Ю.В., Левихин А.А., Кузьмин А.М. Основы проектирования трехкомпонентного газогенератора синтез-газа // НефтеГазоХимия. 2017. № 4. С. 9-16.

24. Кузьмин А.М., Загашвили Ю.В., Левихин А.А., Побелянский А.В., Анискевич Ю.В., Галаджун А.А. Отчет о НИР: Теоретическое исследование режимных параметров и облика нового генератора синтез-газа, разработка автоматизированной системы контроля и управления и конструкторской документации генератора. СПб.: ГСГ, 2016. 115 с. URL: <https://www.rosrid.ru/ikrbs/detail/WME2CLDBKNCEZPMA66ZUXNZZ> (дата обращения: 11.04.2021).

25. Программа для ЭВМ 2021616736 РФ. Газогенератор синтез-газа / А.М. Кузьмин, Е.М. Гашевский, О.В. Арипова, С.Н. Ценева. 2021614369, Заявлено 26.03.2021; Оpubл. 26.04.2021.

26. Пат. 192458 РФ, МПК В 01 J 7/00. Газогенератор синтез-газа / А.М. Кузьмин, Ю.В. Загашвили. 2019113943, Заявлено 08.05.2019; Опубл. 17.09.2019. Бюл. 26.

27. Пат. 196884 РФ, МПК В 01 J 7/00. Газогенератор синтез-газа / А.М. Кузьмин. 2019127455, Заявлено 31.08.2019; Опубл. 18.03.2020. Бюл. 8.

References

1. Bakhtizina N.V. Vovlechenie v razrabotku nevestrebovannykh resursov rossiiskogo gaza s primeneniem tekhnologii GTL [Involvement in the Development of Unclaimed Russian Gas Resources Using GTL Technology]. *Natsional'nye interesy: priority i bezopasnost' – National Interests: Priorities and Security*, 2013, Vol. 9, No. 8 (197), pp. 24-28. [in Russian].

2. Arutyunov V.S., Savchenko V.I., Sedov I.V., Makaryan I.A., Shmelev V.M., Aldoshin S.M. Novye kontseptsii razvitiya malotonnazhnoi gazokhimii [New Conceptions for Development of Small-Scale Gas Chemistry]. *NeftGazoKhimiya – Oil and Gas Chemistry*, 2014, No. 4, pp. 19-23. [in Russian].

3. Savchenko V.I., Makaryan I.A., Fokin I.G., Sedov I.V., Magomedov R.N., Lipilin M.G., Arutyunov V.S. Malotonnazhnye GTL-protsessy na baze pryamogo partsial'nogo okisleniya uglevodorodnykh gazov bez stadii polucheniya sintez-gaza [Small-Scale GTL-Processes Based on Direct Partial Oxidation of Hydrocarbon Gases Without a Synthesis Gas Production Stage]. *Neftepererabotka i neftekhimiya. Nauchno-tekhnicheskie dostizheniya i peredovoi opyt – Oil Processing and Petrochemistry*, 2013, No. 8, pp. 21-26. [in Russian].

4. Fokin I.G., Savchenko V.I., Arutyunov V.S. Partsial'noe gazofaznoe okislenie uglevodorodnykh gazov s reguliruемым sootnosheniem metanola i monooksida ugleroda v produktakh okisleniya [Partial Gas-Phase Oxidation of Hydrocarbon Gases with an Adjustable Methanol-to-Carbon Monoxide Ratio in the Oxidation Products]. *Khimicheskaya fizika – Khimicheskaya Fizika*, 2014, Vol. 33, No. 4, pp. 22-26. DOI: 10.7868/S0207401X14040037. [in Russian].

5. Arutyunov V.S., Savchenko V.I., Sedov I.V. O perspektivakh promyslovykh gazokhimicheskikh tekhnologii na osnove azotsoderzhashchego sintez-gaza [Prospects of Field Gas Chemical Technologies Using Nitrogen-Diluted Syngas]. *NefteGazoKhimiya – Oil and Gas Chemistry*, 2016, No. 4, pp. 14-23. [in Russian].

6. Zagashvili Yu.V., Efremov V.N., Kuzmin A.M., Lishchiner I.I. Kompleks polucheniya sintez-gaza dlya malotonnazhnogo proizvodstva metanola [Complex for Obtaining Synthesis-Gas for Smalltonnage Production of Methanol]. *NefteGazoKhimiya – Oil and Gas Chemistry*, 2017, No. 1, pp. 19-26. [in Russian].

7. Zagashvili Yu.V., Kuzmin A.M. Optimizatsiya sostava sintez-gaza dlya malotonnazhnogo proizvodstva metanola [Optimization of the Composition of the Synthesis Gas for Small-Tonnage Roduction of Methanol]. *NefteGazoKhimiya – Oil and Gas Chemistry*, 2018, No. 3, pp. 39-43. DOI: 10.24411/2310-8266-2018-10303. [in Russian].

8. Chaika S.E., Shkoda A.M. Malotonnazhnye GTL-ustanovki [Small-Scale GTL Plants]. *NewChemistry*. Available at: http://www.newchemistry.ru/printletter.php?n_id=6615 (accessed 07.04.2021). [in Russian].

9. Shapovalova A. Kratkii obzor rossiiskogo rynka metanola po itogam 2019 goda [Brief Overview of the Russian Methanol Market at the End of 2019]. *Refinitiv*. Available at: www.refinitiv.ru/blog/market-insights/kratkij-obzor-rossijskogo-rynka-metanola-po-itogam-2019/ (accessed 07.04.2021). [in Russian].

10. Metanol 2019 [Methanol 2019]. *Creon Conferences*. Available at: <http://www.creon-conferences.com/consulting/detailConf.php?ID=126542> (accessed 08.04.2021). [in Russian].

11. Grunvald A.V. Rost potrebleniya metanola v gazovoi promyshlennosti Rossii i geokologicheskie riski, vznikayushchie pri ego ispol'zovanii v kachestve ingibitora gidratoobrazovaniya [Growth in Methanol Consumption in the Russian Gas Industry and Geoecological Risks Arising from its Use as an Inhibitor of Hydrate Formation]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Neftegazovoe*

delo» – *Electronic Scientific Journal «Oil and Gas Business»*, 2007, No. 2, pp. 27. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Grunvald/Grunvald_2.pdf (accessed 09.04.2021). [in Russian].

12. Makhmutov R.A. *Optimizatsiya tekhnologii malotonnazhnogo protsessa sinteza metanola na mestorozhdeniyakh krainego severa: dis. kand. tekhn. nauk* [Optimization of the Technology of the Low-Tonnage Methanol Synthesis Process in the Fields of the Far North: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Ufa, 2013. 120 p. [in Russian].

13. Yunusov R.R., Shevkunov S.N. Metanol'nyi proekt «NOVATEKA» [Methanol Project «NOVATEK»]. *NewChemistry*. Available at: https://www.newchemistry.ru/printletter.php?n_id=5504 (accessed 10.04.2021). [in Russian].

14. Lishchiner I.I., Malova O.V., Tarasov A.L., Maslennikov V.M., Vyskubenko Y.A., Tolchinskii L.S., Dolinskii Y.L. Synthesizing Methanol from Nitrogen-Ballasted Syngas. *Catalysis in Industry*, 2010, Vol. 2, pp. 368-373. DOI: 10.1134/S2070050410040112.

15. Indarto A., Palguandi J. *Syngas: Production, Applications, and Environmental Impact*. New York, Nova Science Publishers Inc, 2013. 365 p.

16. Li Q., Wang T., Liu Y., Wang D. Experimental Study and Kinetics Modeling of Partial Oxidation Reactions in Heavily Sooting Laminar Premixed Methane Flames. *Chemical Engineering Journal*, 2012, Vol. 207-208, pp. 235-244. DOI: 10.1016/j.cej.2012.06.093.

17. Kubikov V.B., Egorov A.V., Grabin O.A., Ershov Yu.S. *Vysokoproizvoditel'nyi generator sintez-gaza* [High Performance Synthesis Gas Generator]. Patent RF, No. 2310600, 2007. [in Russian].

18. Bilera I.V., Kolbanovskii Yu.A., Petrov S.K., Plate N.A., Rossikhin I.V. *Sposob polucheniya sintez-gaza pri gorenii i ustroistvo dlya ego osushchestvleniya* [Method for Producing Synthesis Gas During Combustion and Device for its Implementation]. Patent RF, No. 2320531, 2008. [in Russian].

19. Filimonov Yu.N., Prokhorov N.S., Chentsov M.S., Savchenko G.B., Sokolov V.S. *Reaktor dlya polucheniya sintez-gaza* [Synthesis Gas Reactor]. Patent RF, No. 2392297, 2010. [in Russian].

20. Koroteev A.A., Korovin G.K., Lozino-Lozinskaya I.G., Vorobev B.A., Oskolkov N.V., Shigin R.L. *Generator sintez-gaza* [Syngas Generator]. Patent RF, No. 2408417, 2011. [in Russian].

21. Filimonov Yu.N., Aniskevich Yu.V., Krasnik V.V., Zagashvili Yu.V., Galadzhun A.A. *Ustroistvo dlya polucheniya sintez-gaza* [Syngas Production Device]. Patent RF, No. 2523824, 2014. [in Russian].

22. Mordokovich V.Z., Sineva L.V., Kulchakovskaya E.V. Chetyre pokoleniya tekhnologii polucheniya sinteticheskogo zhidkogo topliva na osnove sinteza Fishera-Tropscha. Istoricheskii obzor [Four Generations of Fischer-Tropsch-Based Synthetic Liquid Fuel Technology. Historical Overview]. *Kataliz v promyshlennosti – Catalysis in Industry*, 2015, No. 5, pp. 23-45. DOI: 10.18412/1816-0387-2015-5-23-45. [in Russian].

23. Zagashvili Yu.V., Levikhin A.A., Kuzmin A.M. Osnovy proektirovaniya trekhkomponentnogo gazogeneratora sintez-gaza [Foundations of Design of Three-Component Gas Generator of Synthesis Gas]. *NefteGazoKhimiya – Oil and Gas Chemistry*, 2017, No. 4, pp. 9-16. [in Russian].

24. Kuzmin A.M., Zagashvili Yu.V., Levikhin A.A., Pobelyanskii A.V., Aniskevich Yu.V., Galadzhun A.A. *Otchet o NIR: Teoreticheskoe issledovanie rezhimnykh parametrov i oblika novogo generatora sintez-gaza, razrabotka avtomatizirovannoi sistemy kontrolya i upravleniya i konstruktorskoj dokumentatsii generatora* [Research Report: Theoretical Study of Operating Parameters and the Appearance of a New Synthesis Gas Generator, Development of an Automated Monitoring and Control System and Design Documentation for the Generator]. St. Petersburg, GSG Publ., 2016. 115 p. Available at: <https://www.rosrid.ru/ikrbs/detail/WME2CLDBKNCEZPMA66ZUXNZZ> (accessed 11.04.2021). [in Russian].

25. Kuzmin A.M., Gashevskii E.M., Aripova O.V., Tseneva S.N. *Gazogenerator sintez-gaza* [Syngas Gas Generator]. Computer Program RF, No. 2021616736, 2021. [in Russian].

26. Kuzmin A.M., Zagashvili Yu.V. *Gazogenerator sintez-gaza* [Syngas Gas Generator]. Patent RF, No. 192458, 2019. [in Russian].

27. Kuzmin A.M. *Gazogenerator sintez-gaza* [Syngas Gas Generator]. Patent RF, No. 196884, 2020. [in Russian].

Сведения об авторах

About the authors

Кузьмин Алексей Михайлович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Двигатели и энергоустановки летательных аппаратов», БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова; советник РАЕН; генеральный директор ООО «ГСГ», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Aleksey M. Kuzmin, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Engines and Power Plants of Aircraft Department, Baltic State Technical University; Council of the Russian Academy of Natural Sciences; General Director, GSG LLC, Saint-Petersburg, Russian Federation

e-mail: kuzmin.lex@gmail.com

Кулаков Кирилл Вадимович, инженер по специальности 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей», БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, г. Мончегорск, Российская Федерация

Kirill V. Kulakov, Engineer, Baltic State Technical University, Monchegorsk, Russian Federation

e-mail: kirill.kulakov.97@mail.ru

Кулаков Савелий Вадимович, инженер по специальности 24.05.02
«Проектирование авиационных и ракетных двигателей», БГТУ
«ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, г. Мончегорск, Российская Федерация

Saveliy V. Kulakov, Engineer, Baltic State Technical University,
Monchegorsk, Russian Federation

e-mail: kulakov.true@mail.ru

Ценева София Николаевна, аспирант кафедры «Двигатели и
энергоустановки летательных аппаратов», БГТУ «ВОЕНМЕХ» им.
Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Sofia N. Tseneva, Postgraduate of Engines and Power Plants of Aircraft
Department, Baltic State Technical University, Saint-Petersburg, Russian
Federation