

A.M. Kuzmin, A.A. Levikhin, Yu.V. Kuzmina, S.N. Tceneva

INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN OIL AND GAS CHEMISTRY, ENERGY AND ECOLOGY BASED ON GAS GENERATORS AND HIGH-TEMPERATURE REACTORS

Aleksey M. Kuzmin – senior lecturer, the Department of Engines and Power Plants of Aircrafts, D. Ustinov Baltic State Technical University, PhD in Engineering, associate professor, St. Petersburg; **e-mail: kuzmin.lex@gmail.com.**

Artem Levikhin – Head of the Department of Engines and Power Plants of Aircrafts, D. Ustinov Baltic State Technical University, PhD in Engineering, associate professor, St. Petersburg; **e-mail: levihin1981@gmail.com.**

Yulia Kuzmina – postgraduate student, the Department of Engines and Power Plants of Aircrafts, D. Ustinov Baltic State Technical University, St. Petersburg; **e-mail: julia-kuz@inbox.ru.**

Sofia Tceneva – postgraduate student, the Department of Engines and Power Plants of Aircrafts, D. Ustinov Baltic State Technical University, St. Petersburg; **e-mail: tceneva.sn@gmail.com.**

The improvement of power plants of various types is always inextricably linked to the search of ways to achieve full and effective conversion of initial chemical energy of fuel into useful work and to obtain a working fluid with the required physical and chemical characteristics in compliance with ecological and environmental measures. One of the most promising ways of solving the problem in question is to develop high-efficiency and low-toxic high-temperature reactors, gas generators, and steam and gas generators that incorporate the best achievements of the rocket engine industry.

Keywords: *high-temperature reactor; syngas-gas generator; steam and gas generator; ecology; syngas; methanol; hydrogen; oil recovery; jet drilling.*

A.M. Кузьмин, А.А. Левихин, Ю.В. Кузьмина, С.Н. Ценева

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НЕФТЕГАЗОХИМИИ, ЭНЕРГЕТИКЕ И ЭКОЛОГИИ НА ОСНОВЕ ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕАКТОРОВ

Алексей Михайлович Кузьмин – доцент кафедры двигателей и энергоустановок летательных аппаратов, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, кандидат технических наук, г. Санкт-Петербург; **e-mail: kuzmin.lex@gmail.com.**

Артем Алексеевич Левихин – зав. кафедрой двигателей и энергоустановок летательных аппаратов, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, кандидат технических наук, доцент, г. Санкт-Петербург; **e-mail: levihin1981@gmail.com.**

Юлия Валерьевна Кузьмина – аспирант кафедры двигателей и энергоустановок летательных аппаратов, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург; **e-mail: julia-kuz@inbox.ru.**

София Николаевна Ценева – аспирант кафедры двигателей и энергоустановок летательных аппаратов, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург; **e-mail: tceneva.sn@gmail.com.**

Совершенствование энергетических установок различного типа всегда неразрывно связано с поиском путей полного и эффективного преобразования исходной химической энергии топлива в полезную работу и получения рабочего тела с требуемыми физико-химическими характеристиками при соблюдении экологических и природоохранных мероприятий. Одно из перспективных направлений решения проблемы состоит в разра-

ботке высокоэффективных и малотоксичных высокотемпературных реакторов, газогенераторов, парогазогенераторов, в конструкцию которых заложены лучшие достижения ракетного двигателестроения.

Ключевые слова: высокотемпературный реактор (ВТР); газогенератор синтез-газа (ГСГ); парогазогенератор (ПГГ); экология; синтез-газ; метанол; водород; нефтеотдача; бурение.

Введение

На базе достижений в области ракетостроения разработаны и запатентованы многоцелевые высокотемпературные реакторы, газогенераторы, парогазогенераторы (далее – ВТР) с уникальными технологическими характеристиками.

На лабораторных и пилотных установках отработаны процессы глубокой переработки углеводородного сырья для получения ценных продуктов нефтегазохимии: водорода, этилена, пропилена, метанола, диметилэфира, а также технического углерода. Созданы экспериментальные мобильные теплогенерирующие установки установки по утилизации хлорсодержащих веществ.

ВТР является газовым реактором с уникальными возможностями управления технологическими процессами (рис. 1). В зависимости от требований конкретных технологий, ВТР работает в широком интервале давлений (0,3–15 МПа) и температур (до 3500 К). Время выхода реактора на режим и полной остановки процесса не превышает единиц секунд. Достоинством

ВТР является их высокая производительность при малых массогабаритных характеристиках.

Конструктивные особенности и рабочие процессы

ВТР – это основной модуль технологического комплекса, в котором в зависимости от технического решения и решаемой задачи происходят процессы высокотемпературной конверсии, парциального окисления углеводородного сырья, а также пиролиз и высокоскоростной пиролиз и т.п. Рассмотрим конструкцию ВТР и его основные элементы. ВТР, схематично изображенный на рис. 1, представляет собой сварную, сборно-разборную конструкцию на фланцевых соединениях и состоит из следующих узлов: запальное устройство, смесительная головка, камера сгорания, узел впрыска, испарительная камера, узел отбора проб.

Организация рабочего процесса в ВТР является схожей с организацией внутрикамерных процессов газогенераторов и камер сгорания ЖРД. Поэтому для первоначального расчета основных параметров

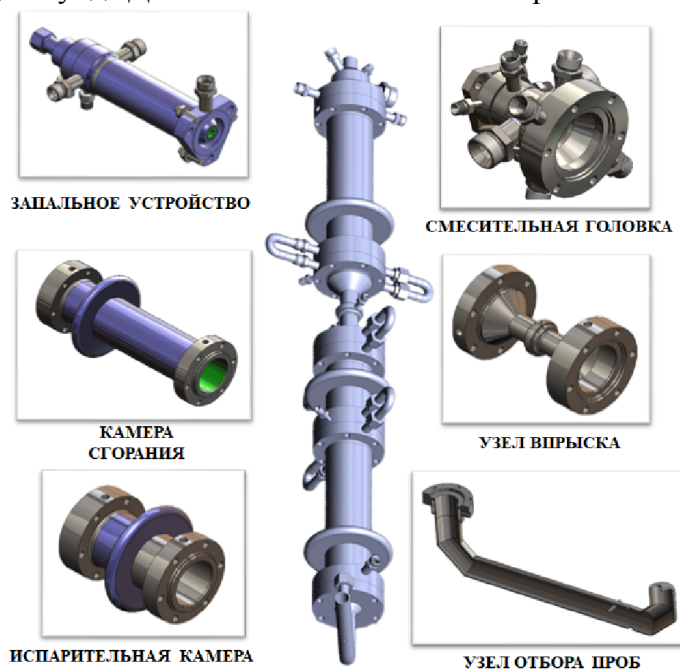


Рис. 1. Высокотемпературный реактор

ВТР можно применять достаточно хорошо отработанные методики расчета ЖРД [1; 3; 13]. Однако имеются и существенные отличия, затрудняющие расчет элементов конструкции, что требует детальной и последовательной проработки.

Физическую модель ВТР поясним с помощью рис. 2, на котором обозначены: СГ – смесительная головка, КС – камера сгорания, УВ – узел впрыска, ИК – испарительная камера, К – кольцо сброса, КП – камера перемешивания.

Горючее и окислитель через СГ подаются в объем КС (зона 1), где благодаря источнику тепла и активных центров они воспламеняются от работающего запального устройства.

При отдельной подаче горючего и окислителя на границе их раздела образуется так называемая поверхность тангенциального разрыва, вблизи которой будет существовать поверхность со стехиометрическим соотношением компонентов, где и будет происходить горение. Горючее, поступающее в КС, условно разделим на две порции: одна порция будет реагировать с окислителем при стехиометрическом соотношении $\alpha=1$, а вторая – нагреваться и разлагаться без доступа кислорода. Назовем эту часть горючего «дополнительным».

«Дополнительное» горючее также условно разделим на две части: одна часть, сохраняя тангенциальную закрутку, будет двигаться вдоль стенки к выходу КС, а вторая часть «дополнительного» горючего окажется затянутой в зону обратных токов ПС. Очевидно, что температурное, химическое и временное воздействие на каждую порцию «дополнительного» горючего

будет не одинаково.

В испарительную камеру – зону 2 – подается вода через ряд тангенциальных отверстий, расположенных на боковой поверхности узла впрыска. Такой ввод жидкости обеспечивает, во-первых, надежное воспламенение и устойчивое горение компонентов, во-вторых, защищает стенку камеры от интенсивных тепловых потоков и прогаров. В-третьих, такой ввод служит одним из эффективнейших способов сажеподавления: механического, т.к. образовавшиеся частички сажи сносит потоком, и они не могут закрепиться на стенке, химического, т.к. пары воды сдвигают химическое равновесие в сторону образования газообразных продуктов, в том числе водорода и монооксида углерода [2; 5; 11].

В конце зоны 2 установлено кольцо сброса, назначение которого состоит в сбросе пелены жидкости в высокотемпературный газовый поток, обеспечив при этом необходимую мелкодисперсность распыла и равномерность распределения частичек жидкой воды по сечению камеры перемешивания в зоне 3. В конце зоны 3 газ имеет однородную, гомогенную структуру, а его состав и свойства близки к своим идеализированным теоретическим значениям, полученным в результате термодинамического расчета [6].

В связи с указанными характеристиками ВТР (диапазоны давлений и температуры, компоненты) могут быть успешно использованы для широкого применения в самых различных областях, открывая возможность осуществления принципиального технологического прорыва для многих производств. Можно выделить направле-

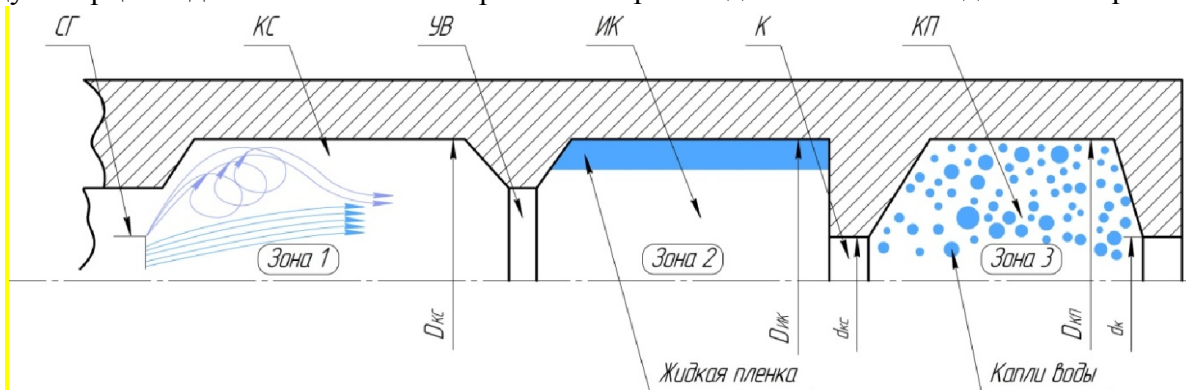


Рис. 2. Расчетная схема рабочего процесса в ВТР

ния, в которых имеется интеллектуальный и технологический задел: производство синтез-газа, производство этилена, производство водорода, производство сажи (технического углерода), повышение отдачи нефтяных пластов за счет применения парогазогенераторов, повышение производительности бурового оборудования (особенно для тяжелых грунтов), технология переработки попутных нефтяных газов в моторные топлива, создание мобильных тепловых и когенерационных установок, создание установок по утилизации токсичных и отравляющих веществ. Далее немного подробнее рассмотрим некоторые из вышеперечисленных технологий.

Технология переработки попутных нефтяных газов в газогенераторе синтез-газа

С учетом мировых тенденций изменения структуры сырьевой базы, возрастающих экологических требований к химическим технологиям исходным сырьем для получения синтез-газа в долгосрочной перспективе являются углеводородные газы, такие как метан, попутный нефтяной газ, сланцевые газы и др. [5; 11].

Синтез-газ используется в нефте- и газохимической промышленности для производства базовых товарных продуктов органического синтеза: аммиака NH_3 , метанола CH_3OH , водорода H_2 , диметилового эфира (ДМЭ), уксусной кислоты, му-

равьиной кислоты [2].

Ключевым процессом указанной технологии является стадия получения синтез-газа – основного продукта для последующего использования в технологии производства продуктов химической промышленности, например, таких как метанол. Состав синтез-газа, отношение водорода и монооксида углерода определяются требованиями синтеза метанола.

Балансовые соотношения образующегося синтез-газа на выходе газогенератора синтез-газа (далее – ГСГ) (рис. 3) зависят от параметров режима парциального окисления, конструкции газогенератора.

На получение синтез-газа по существующим в настоящее время технологиям тратится более 50% общей стоимости капиталовложений. По предварительным оценкам предлагаемая технология позволит снизить стоимость стадии получения синтез-газа на 30–50%, что позволит существенно снизить стоимость получаемых моторных топлив и других синтез-продуктов [4; 7].

Например, технология получения моторных топлив включает три основных этапа: производство синтез-газа, синтез промежуточного продукта (метанола) и получение конечного продукта. Технология обеспечивает высокую эффективность процесса переработки природного и/или попутного газа любого состава в конечный продукт.

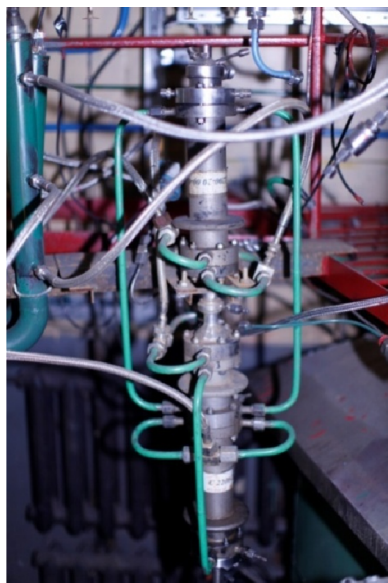


Рис. 3. Газогенератор синтез-газа

Получение водорода риформингом углеводородных топлив

Одной из актуальных проблем является получение водорода для различных технологических применений [12; 14]. В разработанной технологической схеме сходным энергоносителем являются традиционные углеводородные горючие – моторные топлива, а также природный или попутный нефтяной газ.

В основе предложенного метода лежит двухстадийное окисление углеводородных горючих. На первой стадии в ВТР осуществляется парциальное окисление топлива при недостатке окислителя (кислорода или воздуха) с образованием водородсодержащего синтез-газа. Процентный состав получаемого синтез-газа зависит от вида используемого топлива и окислителя, а также их соотношения.

Для увеличения доли водорода полученный синтез-газ направляется на вторую ступень – каталитическое окисление СО (конверсия СО).

Для отделения водорода от балластных газов (СО₂ и азота в случае использования атмосферного воздуха) используются установки на основе мембранных технологий, чистота получаемого водорода до 0,999.

В настоящее время экспериментально подтверждена возможность создания мобильных установок с использованием в качестве исходного энергоносителя дизельного топлива, а также установок на исходных компонентах природный газ – воздух. Разработана атмосферонезависимая установка [4] с полной утилизацией отходящих газов, а также экспериментальная стенд-установка производства во-

дородсодержащего газа 150 нм³/час. Кроме того, разработана опытно-демонстрационная установка производства водородсодержащего газа 300 нм³/час (рис. 4).

Технология высокоскоростного пиролиза углеводородного сырья

На текущий момент высокотемпературная переработка широких фракций нефтепродуктов традиционными способами не удовлетворяет современным требованиям. Эффективным путем решения проблемы является создание нового технологического процесса высокоскоростного термического разложения углеводородного сырья с использованием ВТР (рис. 5), позволяющего повысить глубину переработки.

Особенностью предлагаемой технологии является совмещение стадий получения рабочего тела и стадии пиролиза сырья в одном компактном устройстве в отличие от традиционно существующих технологий.

Технология высокоскоростного пиролиза позволяет использовать в качестве окислителя не только технический кислород, но и кислород воздуха. Использование воздуха уменьшает класс опасности производства, снижает капитальные и эксплуатационные затраты. В качестве горючего в данной технологии могут применяться природный газ, мазут, прямогонный бензин и др.

Технология высокоскоростного термического разложения в ВТР даёт возможность повысить выход продукта (этилен, полипропилен, ацетилен) до 50–70% от исходного углеводородного сырья.

При высокоскоростном пиролизе прямогонных бензинов основным продук-



Рис. 4. Общий вид установки получения водорода ОДУ-300 (ООО «РЕАКТОР», 2016 г.)

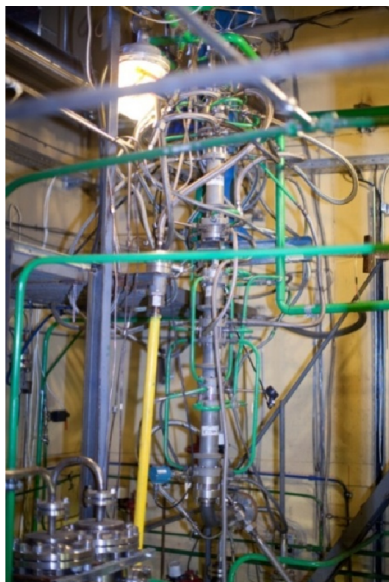


Рис. 5. Прямоточный ВТР для гетерогенного пиролиза углеводородного сырья

том разложения является этилен. Помимо этилена на выходе получают ценные продукты, такие как пропилен, бутилен и бензол.

Мобильная установка по уничтожению хлорорганических веществ

Процесс высокотемпературного уничтожения токсичного вещества осуществляется путем использования мощной тепловой волны в специальных высокотемпературных реакторах, чем достигается быстрое и полное разложение исходного вещества на элементарные составляющие. Использование высокотемпературного уничтожения обходится дешевле, технологические устройства для его осуществления более компактны и значительно легче.

Создана и работает модельная уста-

новка ВТР, где реализован способ высокотемпературного уничтожения высокотоксичных жидких отходов, в частности полихлорированных бифенилов (ПХБ).

Малые размеры ВТР позволяют создавать мобильные установки (рис. 6), размещая их на автомобилях, железнодорожных платформах или морском транспорте, открывая возможность их использования непосредственно в местах хранения БОВ и, тем самым, исключая опасность транспортировки БОВ от складов к месту переработки. При этом установка по своим характеристикам может соответствовать требованиям, предъявляемым к таким химическим установкам, эксплуатация которых не требует создания специальной защитной зоны.

ВТР могут быть использованы для

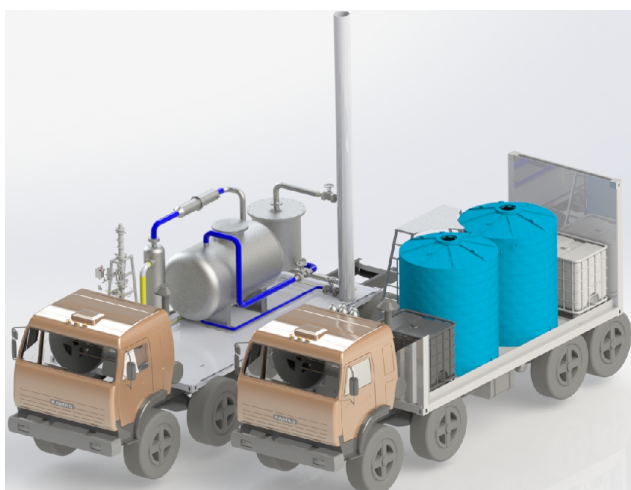


Рис. 6. Мобильная установка по уничтожению хлорорганических веществ

дожигания (доокисления и нейтрализации) газообразных промышленных выбросов, в том числе возникающих при традиционном огневом уничтожении твердых бытовых и промышленных отходов.

Внедрение экологически совершенной технологии по переработке в ВТР токсичных и особотоксичных органических веществ (при любом содержании в них воды) позволит создавать высокоэффективные городские и региональные заводы по переработке органических отходов. В свою очередь размещение подобных установок на крупных предприятиях в значительной степени уменьшит необходимость транспортировки токсичных веществ и частично разгрузит заводы по переработке отходов [7; 8].

Мобильная установка для увеличения нефтеотдачи

При современной технологии разработки нефтяных месторождений с поддержанием пластового давления путем закачки воды в пласт не обеспечивается полное извлечение геологических запасов нефти, вследствие чего в недрах остается свыше 50%, а по месторождениям с высоковязкой нефтью до 80–85% нефти от ее геологических запасов. Особые трудности возникают при разработке месторождений нефти с вязкостью более $(10-15) \cdot 10^3$ мПа·сек и битумов, мировые запасы которых составляют свыше 900 млрд тонн.

Из всех ныне действующих методов повышения нефтеотдачи пластов как в России, так и за рубежом наиболее подготовленными в технологическом отношении являются термические методы. Они могут применяться в наиболее сложных геолого-промысловых условиях и позволяют добывать нефть вязкостью до 10000–20000 мПа·сек, увеличивая при этом нефтеотдачу в несколько раз – с 6–20% до 30–50%, что недоступно сегодня никакими другими методами.

К сожалению, термическим методам добычи нефти присущи определенные ограничения, препятствующие их широкому внедрению. Некоторые из них имеют физическую природу, другие связаны с неблагоприятным воздействием на окружающую

среду, но основным препятствием для их широкого внедрения является отсутствие высокоэффективной техники.

На протяжении нескольких десятилетий велись научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы в области создания эффективных тепло- и газогенерирующих устройств, в том числе и для интенсификации нефтеотдачи. Наиболее значимые результаты в этом направлении были достигнуты благодаря научной школе, заложенной Владимиром Александровичем Сиротко [9; 10].

Был разработан, изготовлен и испытан комплекс парогазового воздействия на нефтяной пласт основным элементом, которого являлся трехкомпонентный парогазогенератор. Кроме этого, активно велась работа над созданием парогазогенератора на монотопливе с использованием нетоксичных, широкодоступных соединений.

Заключение

В представленной статье рассмотрены различные технологии народно-хозяйственного назначения базирующихся на использовании достижений в ракетном двигателестроении, а именно организации внутрикамерных процессов и конструктивным решениям реализованных в газогенераторах и камерах ЖРД с учетом особенностей эксплуатационных требований.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Анискевич Ю.В. [и др.]*. Выбор режимных параметров процесса парциального газофазного окисления метана кислородом воздуха с целью получения синтез-газа требуемого состава // Журнал прикладной химии. 2009. Т. 82. Вып. 8. С. 1335–1341.
2. *Арутюнов В.С. [и др.]*. Окислительные превращения метана. М.: Наука, 1998. 370 с.
3. *Болгарский А.В. [и др.]*. Рабочие процессы в жидкостно-реактивных двигателях. М.: Государственное издательство оборонной промышленности, 1953. 424 с.
4. *Загашвили Ю.В., Кузьмин А.М.* Малотоннажная установка получения водорода. Патент на полезную модель RU 184920 U1, 14.11.2018. Заявка №

2018123855 от 29.06.2018 г. URL: <http://www.elibrary.ru> (дата обращения: 12.10.2020).

5. Кузьмин А.М. Диверсификация технологий двигателестроения на примере комплексов синтез-газа для малотоннажного производства метанола // Библиотека журнала «ВОЕНМЕХ. Вестник БГТУ». 2020. С. 48–53.

6. Кузьмин А.М. [и др.]. Основы проектирования трехкомпонентных газогенераторов синтез-газа // Нефтегазохимия. 2017. № 4. С. 9–16.

7. Кузьмин А.М. Технические принципы реализации высокотемпературного уничтожения хлорсодержащих органических веществ на примере полихлорбифенилов // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2010. № 4. С. 17–20.

8. Левихин А.А. Технология парогазового воздействия на призабойную зону // Экологические проблемы нефтедобычи: сб. трудов Всерос. науч. конф. / ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет». Уфа: Нефтегазовое дело, 2010. С. 284–287.

9. Левихин А.А., Мустейкис А.И., Полянский А.В., Кузьмин А.М. Методы реализации технологии термогазодинамического разрушения горных пород различной крепости // Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ». 2017. № 37. С. 137–145.

10. Отчет о НИР: Теоретическое исследование режимных параметров и облика нового генератора синтез-газа, разработка автоматизированной системы контроля и управления и конструкторской документации генератора / рук. НИР А.М. Кузьмин. ООО «ГСГ». СПб., 2016. 115 с. // ЕГИСУ НИОКТР: [сайт]. URL: <http://www.rosid.ru/nioctr/JDBZNL5ANBV1BU08S31MDOVM> (дата обращения: 12.10.2020).

11. Фейгина А.А. [и др.]. Перспективы использования водорода в энергетике // Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ». 2017. № 37. С. 148–151.

12. Филимонов Ю.Н. [и др.]. Внутрикамерные процессы ЖРД. СПб.: ВВМ, 2007. 196 с.

13. Кузьмин А.М. Численная реализация физико-математической модели уничтожения хлорорганических соединений // Труды МАИ. 2012. № 52. С. 1.

14. Шарифова С.Э., Левихин А.А., Кузьмин А.М. Научно-техническая направленность кафедры «Двигатели и энергетические установки летательных аппаратов» БГТУ «Военмех» имени Д.Ф. Устинова города Санкт-Петербурга // Приборостроение – 2014: сб. трудов 7 Международной научно-технической конференции (Минск, 19–21 ноября 2014 г.). Минск: Изд-во Белорусского национального технического университета. 2014. С. 398–400.