

UDC 621.43.05, 66.097:547.213

Non-traditional Process of Hydrogen Containing Fuel Mixtures Production for Internal-combustion Engines

¹Gennady G. Kuvshinov²Maksim V. Popov³Evgeny A. Soloviev⁴Armen I. Arzumanyan⁵Georgy A. Peshkov

¹Sochi State University, Russia
Sochi, 354000, Sovetskaya Street, 26 "A"

Professor, doctor (technical)
E-mail: gennady.kuvshinov@gmail.ru

²Novosibirsk State Technical University, Russia
Novosibirsk, 630092, Karl Marks prospect, 20

Scientific associate, Lecturer
E-mail: popovmaxvik@gmail.com

³Novosibirsk State Technical University, Russia
Novosibirsk, 630092, Karl Marks prospect, 20

PhD (technical), Associate professor
E-mail: soloviev@mail.ru

⁴Sochi state university, Russia
Sochi, 354000, Sovetskaya Street, 26 "A"

PhD student
E-mail: arzum_gs@mail.ru

⁵Sochi State University, Russia
Sochi, 354000, Sovetskaya Street, 26 "A"

PhD student

E-mail: goshase@mail.ru

Abstract. The article justifies the perspectives of development of the environmentally sound technology of hydrogen containing fuel mixtures for internal-combustion engines based on the catalytic process of low-temperature decomposition of hydrocarbons into hydrogen and nanofibrous carbon.

Keywords: hydrogen containing fuel; gas-reciprocating engine; pressure; hydrocarbon decomposition; nanofibrous carbon.

1. Введение. Известно [1], что далеко не вся энергия, которая может быть получена при сжигании топлива, преобразуется в двигателе внутреннего сгорания (ДВС) в механическую работу – коэффициент преобразования химической энергии в работу всегда меньше единицы. Основная часть потерь энергии здесь связана с отводом тепла при охлаждении двигателя, уносом тепловой энергии выхлопными газами, несовершенством процесса горения – химическим недожогом, а также с несоответствием временных характеристик процесса горения и перемещения поршня в цилиндре двигателя.

Уменьшение потерь, связанных с охлаждением, может быть достигнуто на пути совершенствования конструкции двигателя и применения новых, более высокотемпературных материалов с низкой теплопроводностью. Для снижения тепловых потерь с отходящими выхлопными газами необходимо утилизировать тепло отходящих газов, что также влечет изменение и усложнение конструкции двигателя.

Повышения КПД двигателя внутреннего сгорания без изменения его конструкции может быть достигнуто за счет соответствующего изменения скорости горения топливо-воздушной смеси в его цилиндре, за счет повышения полноты сгорания топлива, а также лучшего согласования фаз горения топлива и движения поршня двигателя. Действительно, вследствие того, что время сгорания попадающего в цилиндр топлива конечно, а

максимумы температуры и давления газов должны приходиться на определенную фазу движения поршня в цилиндре двигателя, инициировать горение (включение зажигания в случае бензинового и газового двигателя или впрыск дизельного топлива в случае дизельного двигателя) необходимо задолго до достижения поршнем верхней мертвой точки. Так называемый угол опережения зажигания для холостого хода обычно составляет около минус 10 градусов. Время прохождения угла опережения в цикле работы двигателя должно быть близко к времени сгорания топлива в цилиндре. Поэтому, поскольку время горения топливного заряда не зависит от частоты работы двигателя, при увеличении частоты двигателя угол опережения зажигания увеличивается, например, при частоте в 2500 оборотов в минуту до минус 30 градусов и более.

При этом положительная механическая работа совершается, начиная лишь с момента прохода поршнем верхней мертвой точки. Соответственно в той части цикла, когда поршень находится в фазе между моментом инициации горения и верхней мертвой точкой, работа, совершаемая при горении, отрицательна, т.е. начинающее гореть топливо замедляет движение поршня. В итоге работа двигателя зависит от правильно установленного соотношения фаз горения и перемещения поршня. При слишком раннем зажигании (впрыске) появляется детонация, доля отрицательной механической работы становится недопустимо высокой, мощность и КПД падают. При слишком позднем зажигании (впрыске) топливо сгорать не успевает, не развиваются необходимые максимальные температура и давление газов в наиболее благоприятной фазе рабочего такта, как следствие, также падают мощность и КПД, возникает опасность перегрева двигателя.

Таким образом, увеличение скорости горения топлива позволяет увеличить полноту сжигания топлива и уменьшить (по абсолютной величине) угол опережения зажигания и, как следствие, увеличить КПД двигателя.

Скорости горения традиционных моторных топлив (бензина, дизельного топлива, природного газа и других) относительно низкие. Существенно большей (на порядок) скоростью горения обладает водород [2]. Работа двигателя внутреннего сгорания на водороде изучалась в [3], однако применение водорода в качестве моторного топлива пока проблематично.

Тем не менее, установлено, что даже относительно небольшие добавки водорода в топливную смесь (в пределах 2–20 %) способны существенно повысить КПД двигателей внутреннего сгорания, снизить химический недожог и уменьшить содержание вредных примесей (сажи, оксидов азота и углерода) в отходящих газах [4-5].

По оценкам специалистов, примерно половина всего водорода в мире производится на основе паровой конверсии природного газа в синтез-газ (смесь водорода и оксида углерода) [6]. Однако данная технология наиболее эффективна при ее реализации в крупном масштабе, характерном для единичных установок синтеза аммиака. Вместе с тем, даже при таком масштабе производства стоимость водорода остается достаточно высокой, и массовое применение водорода в качестве топлива пока экономически не выгодно. Данная технология относительно сложна, включает множество стадий выделения оксидов углерода из реакционной смеси. Перспективы создания автономных эффективных малотоннажных производств водородного газа, свободного от оксидов углерода, на основе этой классической технологии, связываются с разработкой нового поколения высокоэффективных катализаторов и новых более эффективных процессов удаления оксидов углерода из реакционной смеси. Однако эта задача пока не имеет должного практического продвижения уже в течение многих десятилетий.

Высокая текучесть и взрывоопасность, проблемы перевода в жидкое состояние водорода крайне усложняют системы хранения водорода, особенно если речь идет о емкостях, устанавливаемых на борту транспортного средства. По этой причине на сегодняшний день главным направлением в разработке технологии производства углеводород-водородных топливных смесей для ДВС является направление, основанное на создании автономных источников водорода, которые могут быть установлены в непосредственной близости от ДВС, в том числе и на борту транспортного средства.

Наиболее простым способом получения водорода является электролиз. Благодаря простоте этого метода, именно на электролизе основаны современные бортовые системы приготовления водородсодержащих топливных смесей для ДВС на жидком топливе [7].

Однако это самый неэффективный с термодинамической точки зрения метод получения водорода, поскольку требует электрической энергии, получаемой при сжигании топлива с КПД не более 40 %, затем в процессе электролиза электрическая энергия превращается в химическую энергию водорода, в зависимости от материалов электродов и состава электролита, с КПД не более 60–80 %; далее химическая энергия полученного водорода превращается в работу с КПД порядка 30–40 %. Таким образом, если в качестве исходной энергии рассматривать химическую энергию топлива, сжигаемого на ТЭС, то эта энергия превращается в работу ДВС с КПД не более 8–20 %.

Очевидно, что в случае газопоршневых двигателей при использовании в качестве топлива природного газа бортовые системы получения водорода применять нецелесообразно.

В этом случае водород предлагается получать в стационарных условиях на месте на основе нетрадиционного процесса каталитического разложения природного газа на водород и новый нановолокнистый углеродный материал.

В данной публикации представлены результаты исследования процесса каталитического разложения природного газа при различных давлениях применительно к разработке новой нетрадиционной технологии получения водородсодержащих топливных смесей для газопоршневых двигателей.

2. Методы исследования и экспериментальная установка

Особенности процесса. Одним из наиболее перспективных направлений создания автономных источников водорода, в том числе для ДВС, могут стать новые технологии, основанные на процессе каталитического разложения углеводородов с получением водорода и новых нановолокнистых углеродных материалов (НВУ) [8]:



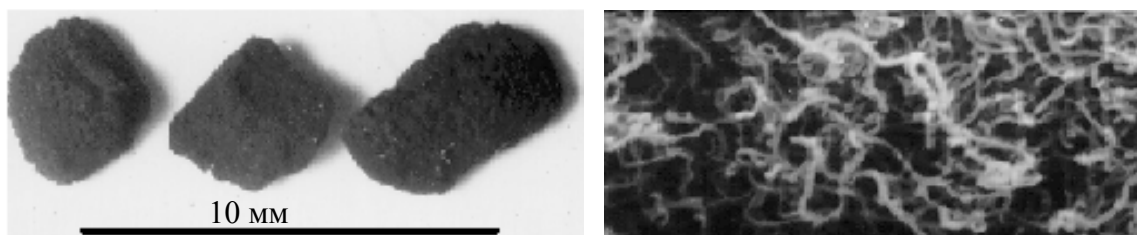
При осуществлении данного процесса оксиды углерода не образуются, поскольку кислород отсутствует в составе исходного сырья. Отлагающийся на катализаторе нановолокнистый углерод является вторым ценным продуктом, благодаря чему стоимость водорода, получаемого в данном процессе, резко снижается. Впервые идея получения водорода, свободного от оксидов углерода, по рассмотренной схеме высказана в [9].

В данном процессе, протекающем в одну стадию при температуре 750-1000К в присутствии катализаторов, содержащих металлы 8-й группы, газообразные продукты реакции представляют собой готовую водородсодержащую топливную смесь, состоящую преимущественно из метана и водорода. Нановолокнистый углерод осаждается на катализаторе и постепенно дезактивирует его. За период дезактивации масса катализаторных частиц может увеличиться в сотни раз так, что эти частицы превращаются фактически в мезопористые углеродные гранулы [10], состоящие из нановолокнистого углерода, в которых материал катализатора содержится в виде примеси (менее 1 %).

В зависимости от типа реактора, состава исходного углеводородного топлива, типа катализатора, температуры и давления свойства получаемого углерода и состав водородсодержащей топливной смеси могут быть разными [11–13].

Наибольшие практические успехи в реализации данного процесса применительно к получению водорода из природного газа достигнуты при использовании высокопроцентных никелевых или медноникелевых катализаторов [11, 13]. Процесс разложения природного газа на никельсодержащих катализаторах с получением гранулированного нановолокнистого углерода и водорода реализован в масштабе пилотного реактора [14].

При разложении метана на Ni-содержащих катализаторах, как правило, образуются волокна толщиной 10–150 нм; отношение длины к толщине волокна – 160–2500. Размеры гранул составляют 2–5 мм (см. рис. 1). Удельная поверхность гранул (без дополнительной активации) – 100–300 м²/г углерода. Углеродные волокна вырастают на активных центрах катализатора - металлических наночастицах - и в ходе разложения углеводородного сырья переплетаются случайным образом, создавая каркас – мезопористую углеродную матрицу с размером пор 12–20 нм и удельной поверхностью порядка 85–135 м²/г [10, 15].



(а) (б)
 Рис. 1. Нановолокнистый углерод: а) внешний вид гранул;
 б) микрофотография волокон

Особый интерес представляют эти материалы в связи с перспективой их применения в качестве адсорбентов для извлечения пенообразующих веществ из абсорбционных растворов, очистки воды и газа от загрязнений нефтью, нефтепродуктами и нефтеотходами, в качестве катализаторов окисления сероводорода в серу в процессах сероочистки природного газа и газовых выбросов нефтепереработки и других приложениях [15-17].

До сих пор исследования каталитического процесса разложения метана и природного газа проводились при атмосферном давлении в основном применительно к изучению влияния свойств катализаторов на свойства получаемого углеродного материала и повышению выхода углерода и водорода на единицу массы катализатора за период его дезактивации.

Решение проблемы разработки технологии получения метан-водородных смесей для газопоршневых двигателей внутреннего сгорания диктует необходимость исследования влияния давления на технологические характеристики данного процесса, поскольку природный газ может находиться под давлением от 25 МПа до атмосферного (2,5 МПа или 10 МПа – в магистральных трубопроводах, 0,005 – 1,2 МПа – в распределительных трубопроводах, до 25 МПа – на газозаправочных станциях).

Условия экспериментов. В качестве исходного углеводородного газа в экспериментах использовался чистый метан. Влияние давления на состав реакционной смеси в диапазоне до 20 МПа оценивалось на основе термодинамических расчетов исходной системы С/Н=1/4 без учета радиуса кривизны углеродных нановолокон по программе NASA [18]. Оценка влияния радиуса кривизны конденсированной фазы углерода на равновесные концентрации компонентов в газовой фазе проводилась на основе формулы Томсона (Кельвина) [19]

$$\ln\left(\frac{Pr_0}{P_0}\right) = \frac{V1}{RT} \cdot \frac{2 \cdot s}{r}, \quad (2)$$

где для рассматриваемого случая

P_0 – давление насыщенных паров углерода в условиях термодинамического равновесия при бесконечной кривизне поверхности частиц конденсированной фазы;

Pr_0 – давление насыщенных паров углерода в условиях термодинамического равновесия при кривизне r поверхности частиц конденсированной фазы;

$V1$ – мольный объем конденсированной фазы углерода;

ρ – плотность конденсированной фазы углерода;

R – газовая постоянная;

T – температура системы;

S – удельная поверхностная энергия углеродных нановолокон (может изменяться от $s = 0,077$ Дж/м² (поверхность графита образована графеновым слоем) до $s = 4$ Дж/м² (поверхность графита образована торцами графеновых слоев);

r – радиус углеродных нановолокон (из экспериментальных данных – 10–150 нм).

Эксперименты проводились при температуре 948К и давлениях в диапазоне 0,1–0,5 МПа. Реакция разложения метана протекала в присутствии никелевого (90%Ni/Al₂O₃) или медно-никелевого (82%Ni–8%Cu/Al₂O₃) катализаторов (в наименовании катализатора

указаны массовые проценты соответствующего элемента). Удельный расход метана в каждом эксперименте составлял 90 литров в час на грамм катализатора.

Методики исследования и экспериментальная установка Схема экспериментальной установки представлена на рис.2. В состав установки входили блок реактора (проточная каталитическая установка Autoclave Engineers BTRS-Jn), блок подачи и автоматической регулировки расходов газов (АРГ) и хроматографический блок измерения концентраций (хроматограф).

В качестве углеводородного газа использовался чистый метан. Газы подавались в реактор из баллонов через редукторы, расходы газов, подаваемых в реактор, контролировались автоматическим многоканальным регулятором расхода. Реактор размещался в трубчатой электропечи. Катализатор засыпался на подложку, расположенную внутри реактора. Нагрев реактора с катализатором до заданной температуры осуществлялся в среде аргона с последующим переключением на метан. Давление в системе регулировалось и контролировалось регулятором обратного давления с манометром.

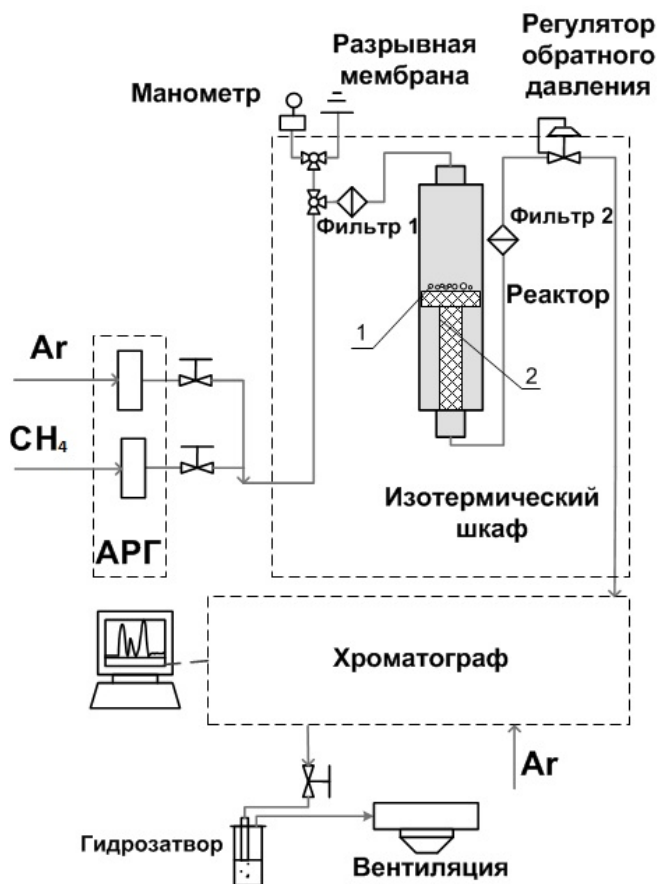


Рис. 2. Схема экспериментальной установки (1 – слой катализатора, 2 - кварцевая подложка)

Измерения концентраций продуктов реакции в отходящих газах осуществлялись методом газовой хроматографии (ХРОМОС ГХ-1000) при использовании детектора по теплопроводности и двух хроматографических колонок с разными наполнителями: Porapak QS и цеолит NaX.

Текстурные характеристики полученных образцов нановолокнистого углерода исследовали с помощью низкотемпературной адсорбции азота при 77 К на адсорбционной установке Quantachrome NOVA 2200e. Удельную поверхность (АБЭТ) рассчитывали по методу БЭТ. Удельную поверхность мезопор (АТ) и объем микропор (VТ) определяли сравнительным методом.

3. Результаты и их обсуждение

Оценки влияния кривизны поверхности углеродных нановолокон на равновесные концентрации компонентов в газовой фазе показали, что это влияние проявляется в области радиусов кривизны менее 10 нм. В нашем же случае, как показывают экспериментальные данные, диаметры углеродных нановолокон находятся в диапазоне более 10 нм. Поэтому этот эффект в дальнейшем не исследовался.

Выполненные термодинамические расчеты хорошо согласуются с имеющимися данными: процесс разложения метана имеет термодинамические ограничения, практически единственными продуктами реакции при нагреве метана в диапазоне температур выше 800К являются углерод и водород, равновесная конверсия метана возрастает при увеличении температуры и снижается при повышении давления. Расчетные зависимости равновесной конверсии метана и концентрации водорода в зависимости от температуры и давления представлены, соответственно, на рис. 3 и 4.

Видно, что при атмосферном давлении равновесная конверсия метана при температуре 803К составляет около 40 %, а при температуре 948К – 75 %. Соответствующие концентрации водорода в продуктах реакции составляют 55 % и 85 %. При давлении 0,2 МПа соответствующие значения конверсии составляют около 10 % и 25 %, а концентрации водорода – 17 % и 40 %. Интересно, что и при давлении 20 МПа равновесная концентрация водорода остается на приемлемом, с точки зрения применения продуктов реакции в ДВС, уровне: при температуре 803К эта величина составляет 5,7%, а при температуре 948К – около 15 %.

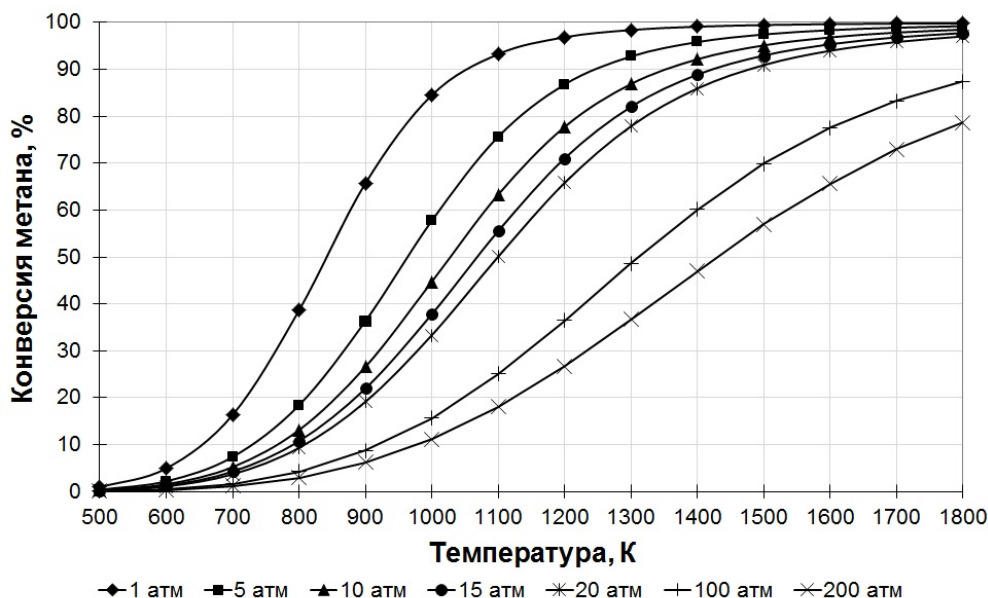


Рис. 3. Влияние температуры и давления на равновесную конверсию метана

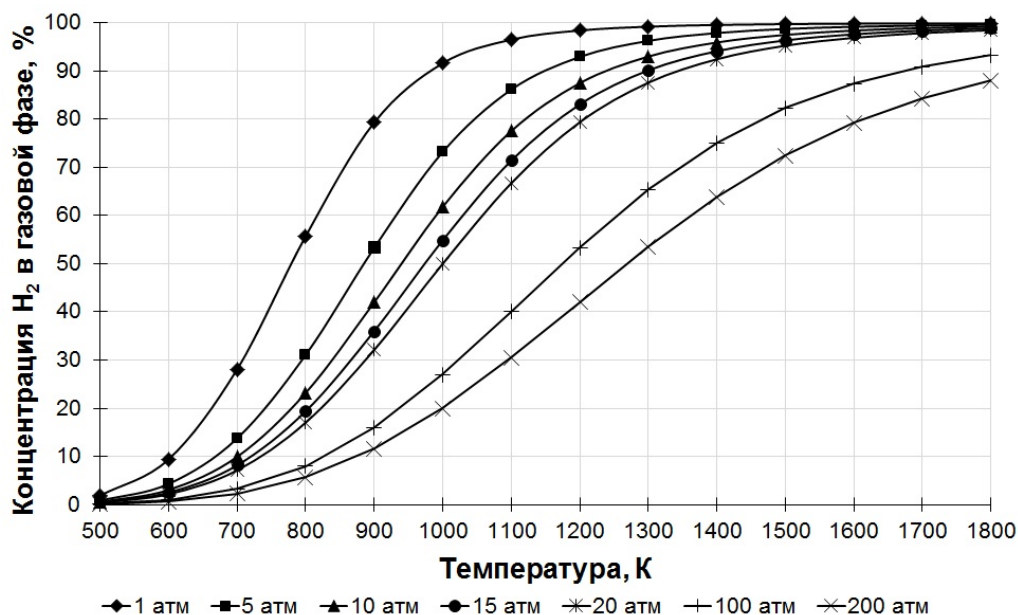


Рис. 4. Влияние температуры и давления на равновесную концентрацию водорода в газовой фазе

Несмотря на то, что расчеты указывают на относительно слабое влияние радиуса кривизны углеродных нановолокон на равновесные концентрации, в экспериментах максимальная конверсия оказывалась всегда заметно ниже равновесного значения, получаемого расчетным путем.

На рис. 5 представлена экспериментальная зависимость конверсии метана от времени, полученная при давлении $P = 0,1$ МПа, температуре $T = 823$ К в присутствии катализатора $90\%Ni/Al_2O_3$.

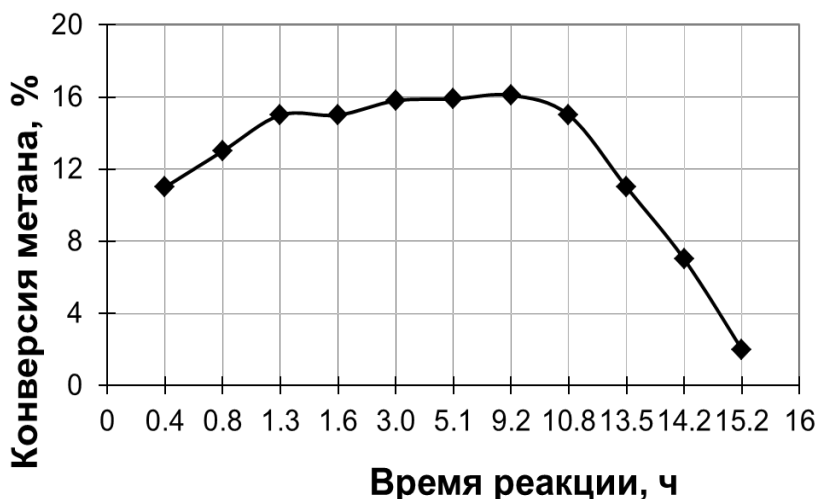


Рис. 5. Изменение конверсии метана во времени ($P = 0,1$ МПа, $T = 823$ К, катализатор $90\%Ni/Al_2O_3$)

Максимальная конверсия здесь достигалась через 1–2 часа после начала процесса (период активации катализатора), затем в течение 8–10 часов конверсия оставалась приблизительно на одном и том же уровне и составляла 16 %, через 12 часов после начала процесса конверсия достаточно быстро снижалась. Полный период дезактивации катализатора составил около 15 часов.

Повышение температуры до 948К при атмосферном давлении позволяет повысить максимальную конверсию, как это видно из рис. 6, до 65 %, но одновременно приводит к резкому снижению периода дезактивации (до 0,5 часа). Суммарный выход водорода и углерода за период дезактивации катализатора также резко снижается (до 2,2 и 6,6 массовых единиц на единицу массы катализатора, соответственно). Повышение давления в случае никелевого катализатора 90 % Ni/Al₂O₃ несколько снижает максимальную концентрацию водорода, однако этот эффект полностью компенсируется увеличением времени жизни катализатора и повышением суммарного выхода водорода и углерода за период дезактивации катализатора.

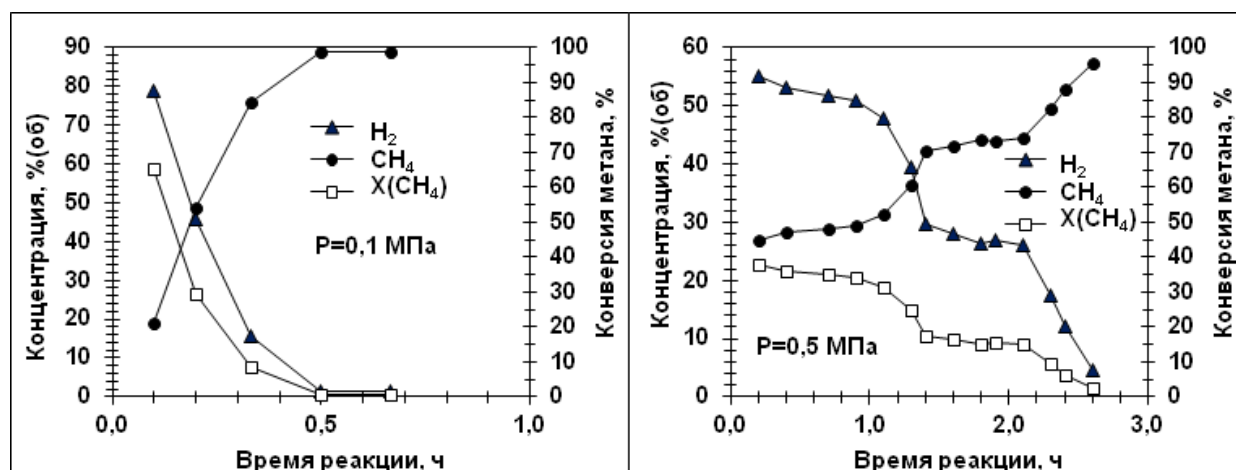


Рис. 6. Изменение характеристик процесса каталитического пиролиза во времени в присутствии никелевого катализатора ($T = 948\text{K}$, катализатор 90%Ni/Al₂O₃)

При этом, тем не менее, следует отметить, что суммарный выход водорода и углерода на никелевом катализаторе при температуре 948К даже при давлении 0,5 ГПа остается относительно небольшим (9 и 27 массовых единиц на единицу массы катализатора, соответственно).

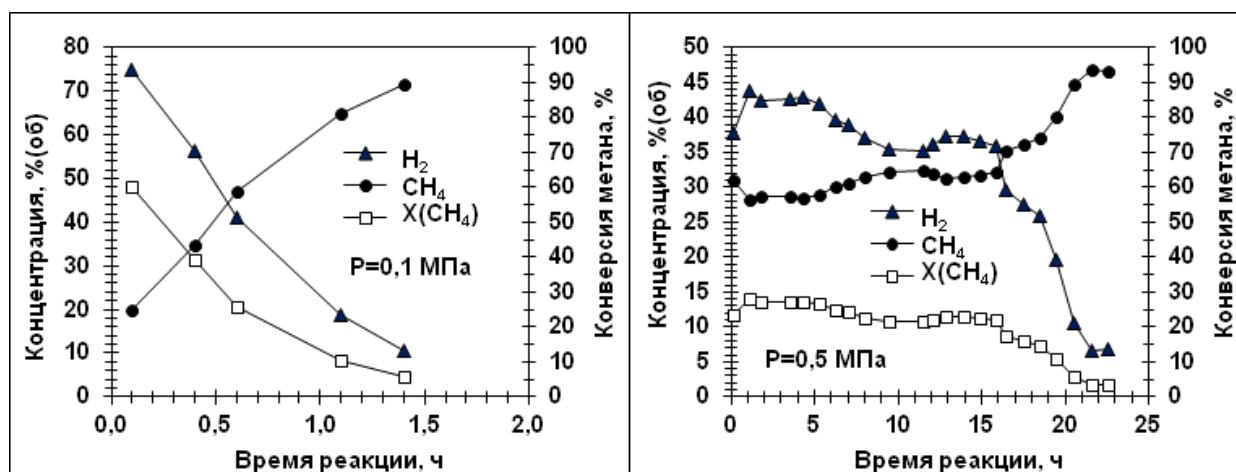


Рис. 7. Изменение характеристик процесса каталитического пиролиза во времени в присутствии никель-медного катализатора ($T = 948\text{K}$, катализатор 82 %Ni–8%Cu/Al₂O₃)

На рис. 7. представлены данные по влиянию давления на характеристики процесса каталитического пиролиза метана в присутствии никель-медного катализатора 82%Ni–8%Cu/Al₂O₃. Из опубликованных данных [13], полученных при атмосферном давлении, известно, что добавка меди в никелевый катализатор приводит к некоторому снижению его активности в реакции разложения метана, но при этом достигается существенное снижение скорости дезактивации катализатора и увеличение суммарного выхода водорода и углерода

на единицу массы катализатора за период его дезактивации. Эти выводы, как можно видеть из рис. 7, также подтверждаются и результатами настоящего исследования. Действительно, сравнивая данные, представленные на рис. 6 и 7 для давления $P=0,1$ МПа, можно видеть, что, хотя тенденция резкого снижения активности катализатора с самого начала процесса здесь сохранилась, тем не менее, время жизни никель-медного катализатора увеличилось по сравнению с никелевым катализатором почти в три раза. При этом суммарный выход водорода и нановолокнистого углерода за период дезактивации катализатора при атмосферном давлении и температуре 948К для данного катализатора составил 5,7 и 17 массовых единиц на единицу массы катализатора, соответственно.

Повышение давления в случае никель-медного катализатора приводит к значительному увеличению периода дезактивации катализатора и, соответственно, суммарного выхода водорода и нановолокнистого углерода за период дезактивации. Для давления 0,3 МПа эти значения составляют 17 и 51 массовых единиц на единицу массы катализатора, а для давления 0,5 МПа - 34 и 200, соответственно. При этом, как можно видеть из рис. 7, при давлении 0,5 МПа концентрация водорода в течение 16–18 часов остается на уровне 40 %.

Влияние давления на свойства получаемого нановолокнистого углерода оценивалось по изменению текстуры материала (см. таблицу). Видно, что увеличение давления до 0,5 МПа приводит к росту удельной поверхности мезопор (A) и объема пор ($V_{\text{общ}}$) получаемого нановолокнистого углерода на 17 % и 16 %, соответственно, а также увеличению объема микропор (V_{T}) почти в 3 раза, что в итоге дает прирост общей удельной поверхности ($A_{\text{БЕТ}}$) около 28 %.

Таблица.

Текстурные характеристики образцов НВУ, полученных в присутствии катализатора 82%Ni–8%Cu/Al₂O₃

Давление, МПа	$A_{\text{БЕТ}}$, м ² /г	A , м ² /г	V_{T} , см ³ /г	$V_{\text{общ}}$, см ³ /г
0,1	130	117	0,005	0,25
0,5	166	137	0,014	0,29

Можно полагать, что все отмеченные эффекты связаны с ускорением процессов гидрогенизации образующегося углерода и промежуточных продуктов при повышении парциального давления водорода. Действительно, дезактивация водорода связана с образованием на поверхности металлической наночастицы капсулирующей углеродной пленки. Процесс же гидрогенизации, протекающий при участии металла, способствует разрушению этой пленки на металлической поверхности и, соответственно, сохранению активности катализатора в течение более длительного времени. Благодаря процессу гидрогенизации углерод на стыке металлической, углеродной и газовой фаз, вступает в реакцию взаимодействия с водородом, благодаря чему поверхность углеродных нановолокон активируется, что сопровождается увеличением удельной поверхности образующегося нановолокнистого углерода и увеличением доли объема микропор.

4. Выводы

Из опубликованных данных следует, что существенное повышение КПД и экологической чистоты двигателей внутреннего сгорания может быть достигнуто за счет добавки в топливо водорода в объеме 2-5% и более. Представленные результаты показывают, что одной из перспективных технологий приготовления метан-водородных топливных смесей для газопоршневых двигателей может стать технология, основанная на процессе каталитического разложения природного газа на водород и нановолокнистый углерод при повышенных давлениях. Выполненные термодинамические расчеты показали, что при разложении метана основными компонентами продуктов реакции являются метан и водород; с увеличением давления конверсия метана и, соответственно, концентрация водорода в продуктах реакции снижается, однако при всех давлениях вплоть до 20 МПа концентрация водорода в метан-водородной смеси остается на достаточном для применения

ее в качестве топлива в газопоршневых двигателях уровне – не менее 5–15 % (в диапазоне температур 800–950К).

В результате экспериментальных исследований установлено, что увеличение температуры в диапазоне 800–950К приводит к существенному увеличению скорости разложения метана, однако, при этом наблюдается резкое уменьшение периода дезактивации никелевого (90%Ni/Al₂O₃) и никель-медного (82%Ni–8%Cu/Al₂O₃) катализаторов, а также суммарного выхода водорода и углерода за период дезактивации. Увеличение давления по отношению к атмосферному позволяет резко уменьшить скорость дезактивации катализатора и при повышенных температурах увеличить более, чем на порядок суммарный выход водорода и нановолокнистого углерода, например, при температуре 948 К и давлениях 0,5 МПа – до 68 и 200 массовых единиц на единицу массы никель-медного катализатора, соответственно. Установлено также, что влияние давления на текстуру получаемого нановолокнистого углерода относительно невелико, хотя его удельная поверхность и доля объема микропор несколько возрастают. Предполагается, что отмеченные эффекты связаны с интенсификацией процессов гидрогенизации образующегося углерода и промежуточных продуктов химической реакции при повышении парциального давления водорода.

Таким образом, предлагаемый процесс обеспечивает переработку природного газа в экологически более чистый энергоноситель (метан-водородную смесь) и ценные углеродные продукты, которые могут использоваться для комплексного решения экологических проблем, сопутствующих нефте- и газодобыче.

В целом, процесс приготовления метан-водородных топливных смесей для газопоршневых двигателей может быть реализован, в зависимости от решаемых технических задач при любых давлениях в диапазоне 0,1–20 МПа. На данном этапе разработки, учитывая достигнутый уровень, рассмотренный процесс может быть реализован в опытно-промышленном масштабе при давлениях до 1 МПа в технологии приготовления метан-водородных смесей для стационарных газопоршневых двигателей, например, применительно к строящейся Кудепстинской ТЭС в г. Сочи.

Для решения вопроса о промышленной реализации процесса при давлениях, характерных для газозаправочных станций (20-25 МПа), необходимы дальнейшие экспериментальные исследования. Дальнейшие экспериментальные исследования необходимо развивать также в контексте разработки автономного оборудования для приготовления водородсодержащих топливных смесей на основе жидких топлив и сжиженного газа непосредственно на борту транспортного средства.

Примечания:

1. Шароглазов Б.А., Фарафонов М.Ф., Клементьев В.В. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчёт процессов. Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2004. 344 с.
2. Гамбург Д.Ю., Семенов В.П., Дубовкин Н.Ф., Смирнова Л.Н. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение. Справочник. М.: Химия, 1989.
3. Варшавский И.Л., Мищенко А.И. Анализ работы поршневого двигателя на водороде. Известия вузов № 10. М.: Машиностроение, 1977.
4. Karim G.A., Wierzba I., Al-Alousi Y. Methan- hydrogen mixtures as fuels. //Int. J. Hydrogen Energy. 1996. V. 21, No. 7, P. 625-621.
5. Злотин Г.Н. Влияние добавок водорода в бензовоздушную смесь на формирование начального очага горения в ДВС с искровым зажиганием // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2008. Т. 6. № 1. С. 77-80.
6. Joensen F., Rostrup-Nielsen J. Conversion of hydrocarbons and alcohols for fuel cells. // J. of Power Sources, N105, 2002, p. 195-201.
7. http://vodorod-na-avto.com/art_additive.html
8. Патент РФ №2064889 В 01 J 20/20 // Авдеева Л.Б., Гончарова О.В., Кувшинов Г.Г. и др. // Бюл. изобр., 1996-№22.
9. Kuvshinov G.G., Mogilnykh Yu.I., Kuvshinov D.G., Zavarukhin S.G. and Parmon V.N. New ecologically sound technology to produce hydrogen and new carbon material via low temperature catalytic pyrolysis //Proceedings of the 11th World Hydrogen Energy Conference, Stuttgart, Germany, 23-28 June, 1996. P. 655-660.

10. Kuvshinov G.G., Mogilnykh Yu.I., Kuvshinov D.G., Ermakov D.Yu., Ermakova M.A., Salanov N.A., Rudina N.A. Mechanism of porous filamentous carbon granule formation on catalytic hydrocarbon decomposition // Carbon 37, (1999), p. 1239–1246.
11. Ermakova M.A., Ermakov D.Yu., Kuvshinov G.G., Plyasova L.M. New Nickel Catalysts for the Formation of Filamentous Carbon in the Reaction of Methane Decomposition // J. Catal., 187 (1999), p. 77-84.
12. Marina A. Ermakova, Dmitriy Yu. Ermakov, Andrey L. Chuvilin and Gennadiy G. Kuvshinov Decomposition of methane over iron catalysts at the range of moderate temperatures: the influence of structure of the catalytic systems and the reaction conditions on the yield of carbon and morphology of carbon filaments. Journal of Catalysis 201 (2001), 183-197
13. Reshetenko T.V., Avdeeva L.B., Ismagilov Z.R., Chuvilin A.L., Ushakov V.A. Carbon capacious Ni-Cu-Al₂O₃ catalysts for high-temperature methane decomposition // Applied Catalysis A: General 2003. V. 247. P. 51–63
14. Кувшинов Г.Г., Заварухин С.Г., Могильных Ю.И., Кувшинов Д.Г. Реализация процесса получения гранулированного каталитического волокнистого углерода в масштабе пилотного реактора // Химическая промышленность. 1998. № 5. С. 300-307.
15. De Jong K.P., Geus J.W. Carbon nanofibers: catalytic synthesis and applications // Catal. Rev. - Sci. Eng. 2000. V. 42(4). P. 481-510.
16. Shinkarev V.V., Glushenkov A.M., Kuvshinov D.G., Kuvshinov G.G. Nanofibrous carbon with herringbone structure as an effective catalyst of the H₂S selective oxidation // Carbon. 2010. V. 48. P. 2004–2012
17. Баннов А.Г., Кувшинов Г.Г. Изучение электропроводности и диэлектрической проницаемости эпоксидных композиционных материалов с добавлением углеродных нановолокон // Материаловедение. 2011. № 10. С. 47-51
18. S. Gordon and B.J. McBride "Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions, Rocket Performance, Incident and Reflected Shocks, and Chapman-Jouguet Detonations", NASA SP-273, NASA Lewis Research Center, Washington, 1971.
19. Люпис К. Химическая термодинамика материалов. М.: Металлургия, 1989.

УДК 621.43.05, 66.097:547.213

Нетрадиционный процесс получения водородсодержащих топливных смесей для двигателей внутреннего сгорания

¹Геннадий Георгиевич Кувшинов

²Максим Викторович Попов

³Евгений Алексеевич Соловьев

⁴Армен Игоревич Арзуманян

⁵Георгий Александрович Пешков

¹ Сочинский государственный университет, Россия

354000, Сочи, ул. Советская, 22 а

Профессор, доктор технических наук

E-mail: gennady.kuvshinov@gmail.ru

² Новосибирский государственный технический университет, Россия

630092, Новосибирск, проспект К. Маркса, 20

Научный сотрудник, преподаватель

E-mail: popovmaxvik@gmail.com

³ Новосибирский государственный технический университет, Россия

630092, Новосибирск, проспект К. Маркса, 20

Кандидат технических наук, доцент

E-mail: soloviov@mail.ru

⁴ Сочинский государственный университет, Россия

354000, Сочи, ул. Советская, 22 а

аспирант

E-mail: arzum_gs@mail.ru

⁵ Сочинский государственный университет, Россия

354000, Сочи, ул. Советская, 22 а

Аспирант

E-mail: goshase@mail.ru

Аннотация. Обосновываются перспективы создания экологически чистой технологии получения водородсодержащих топливных смесей для двигателей внутреннего сгорания на основе каталитического процесса низкотемпературного разложения углеводородов на водород и нановолокнистый углерод.

Ключевые слова: водород содержащий топливо; газо-поршневой двигатель; давление; разложение углеводородов; нановолокнистый углерод.