

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В ТРАНСПОРТНОЙ ОТРАСЛИ

Доктор технических наук **В.И. КОЧЕРГИН**

(Сибирский государственный университет путей сообщения)

Поступила в редакцию: 19.02.2025

Принята к публикации: 21.07.2025

Планируемый массовый переход к водородной энергетике в транспортной отрасли при использовании в качестве топлива чистого водорода связан с решением целого ряда проблем, таких как необходимость кардинальных изменений транспортной инфраструктуры. Предлагается альтернативный путь развития водородной энергетике на транспорте, основанный на организации частичной каталитической конвертации углеводородного топлива в водородсодержащий синтез-газ непосредственно на борту транспортного средства. На данный момент проведены успешные испытания макетного образца каталитического конвертора дизельного топлива и разработана система питания топливом двигателя внутреннего сгорания с подачей водородсодержащего синтез-газа во впускной коллектор. Проведены экспериментальные исследования, подтверждающие перспективность частичной замены дизельного топлива на синтез-газ для повышения экологических, мощностных и топливно-экономических характеристик дизельных двигателей.

Массовый переход к нетрадиционным и возобновляемым источникам энергии и в первую очередь к широкому использованию водородного топлива, в соответствии с существующими прогнозами развития научно-технического прогресса, представляет собой одну из основных составляющих перехода к шестому технологическому укладу. Предполагалось,

что эра водородного топлива начнётся уже в 2020 г., и к 2050 г. водород вытеснит традиционное углеводородное топливо на всех видах транспорта. Однако предполагаемые тренды развития водородной энергетики вряд ли будут реализованы в полной мере по целому ряду причин. Фактическое положение дел обусловлено тем, что применение водорода в чистом виде в ка-

честве топлива столкнулось с целым рядом серьёзных препятствий, таких как сложность транспортировки и хранения; высокий уровень затрат на производство и связанные с этим экологические проблемы. Низкая величина плотности водорода как в сжиженном, так и в газообразном виде создаёт определённые трудности не только при транспортировке на длительные расстояния, но и при его хранении в баках транспортных средств, поскольку недорогие и лёгкие ёмкости для хранения газообразного водорода пока не получили достаточного распространения. Проблему составляет и обеспечение безопасности применения водородного топлива, так как общеизвестно, что при контакте с кислородом воздуха возможно образование взрывоопасной смеси. Вышеперечисленные причины неизбежно приведут к колоссальным затратам на преобразование существующей на транспорте обслуживающей инфраструктуры¹.

В транспортной отрасли газообразное водородное топливо может быть использовано, помимо прямого сгорания в энергетических установках, представляющих собой традиционные двигатели внутреннего сгорания, также и в качестве необходимого компонента для производства электрической энергии в каталитических топливных элементах. Однако существенными недостатками современных конструкций топливных элементов являются их высокая стоимость и относительно малая плотность тока.

¹ Кочергин В.И., Глушков С.П. Особенности решения проблем обеспечения безопасности при реализации инновационных процессов // Вестник ПНИПУ. Безопасность и управление рисками. 2016. № 5. С. 203–209.

Применение водорода в качестве топлива для традиционных тепловых двигателей при прямой подаче водорода в камеры сгорания также связано с некоторыми негативными моментами. Во-первых, требуются значительные изменения традиционных конструкций энергетических установок, обусловленные совместимостью конструкционных материалов двигателя и водорода и вопросами безопасности эксплуатации. Во-вторых, существует проблема возникновения обратных вспышек, вызванных высокой теплотворной способностью водорода. Подача водорода во впускной коллектор позволяет частично решить данные проблемы, но остаются вопросы экономически оправданного производства, безопасного хранения и транспортировки газообразного водорода.

Следует также учитывать возможное влияние повышенной температуры горения водородсодержащего топлива на детали цилиндропоршневой группы, а также процессы взаимодействия водорода с материалами остова двигателя и кривошипно-шатунного механизма. Известно, что длительное воздействие водорода способно вызвать увеличение хрупкости металлов и появление в стальных деталях внутренних трещин. Кроме того, в дискуссиях на просторах интернета встречаются вопросы о том, что же делать с экологически чистыми выбросами в виде воды в случае широкого применения водородных транспортных средств в городских условиях. Особенно остро решение этой проблемы проявляется при эксплуатации транспортно-технологических машин с водородными двигателями в условиях отрицательных температур окружающего воздуха.

С учётом этого в настоящий момент водородное топливо в чистом виде, по сравнению с другими видами моторного топлива, не может быть в полной мере конкурентоспособным, а инновационные проекты по его применению могут успешно реализовываться только при наличии государственной поддержки; необходим поиск альтернативных путей развития водородной энергетики на транспорте. Одним из перспективных и пока ещё недостаточно известных широкой общественности направлений развития водородной энергетики в транспортной отрасли представляется организация производства непосредственно на борту подвижного состава различных видов транспорта водородсодержащего синтез-газа, основными компонентами которого являются водород и окись углерода. В этом случае предполагается частичное или полное замещение синтез-газом основного углеводородного топлива с подачей его во впускной коллектор двигателя внутреннего сгорания. Данный процесс позволит обеспечить реализацию преимуществ водородного топлива без внесения существенных изменений в конструкцию энергетических установок и позволит значительно упростить использование водородного топлива и добиться определённого улучшения их экологических, мощностных и экономических характеристик.

Наличие в составе единой газовой смеси с водородом второго основного компонента – окиси углерода или угарного газа CO – снижает химическую активность и взрывоопасность водорода и частично решает проблему возникновения обратных вспышек во впускных трубопроводах двигателей внутреннего сгорания. Его наличие в исходных продуктах

горения принято считать негативным эффектом использования водородсодержащего синтез-газа, поскольку большая его часть в камере сгорания преобразуется в углекислый газ CO₂, увеличивая его концентрацию в отработавших газах. Наличие углекислого газа в отработавших газах считается нежелательным с точки зрения увеличения выбросов парниковых газов, но имеются и неоспоримые плюсы от увеличения его концентрации в продуктах горения. Дело в том, что CO₂, находясь в камере сгорания под давлением, при открытии выпускных клапанов и резком понижении давления способствует снижению температуры отработавших газов, а также температуры контактирующих с камерой сгорания поверхностей различных деталей двигателя. Данный результат заметно снижает риск появления обратных вспышек.

Наиболее беспроblemными видами топлива для получения синтез-газа с точки зрения простоты каталитического риформинга и отсутствия необходимости предварительного испарения являются природный газ и низшие спирты. Каталитические технологии для конвертирования газообразного топлива в синтез-газ достаточно давно известны и успешно опробованы на автомобильных двигателях. Бензин для реализации подобных каталитических процессов является недостаточно стабильным продуктом, кроме того, присутствующие в нём примеси могут существенно снижать ресурс катализатора, однако известны положительные результаты и его успешной конвертации².

² Кириллов В.А., Кузин Н. А., Амосов Ю.И. и др. Катализаторы конверсии углеводородных и синтетических топлив для бортовых генераторов синтез-газа // Катализ в промышленности. 2011. № 1. С. 60–67.

Наибольший интерес для применения на транспорте представляет получение водородсодержащего синтез-газа из дизельного топлива, поскольку данный вид топлива является одним из наиболее распространённых источников энергии мобильных и стационарных энергетических установок. Такая задача до определённого времени считалась трудно выполнимой, так как тяжёлые углеводородные фракции дизельного топлива с трудом поддаются разложению при использовании обычных каталитических реакторов, а присутствующие в топливе примеси существенно минимизируют ресурс катализатора. Тем не менее учёными Института катализа имени Г.К. Борескова Сибирского отделения РАН (далее – Институт катализа) совместно с Сибирским государственным университетом путей сообщения было разработано устройство, позволяющее реализовать процесс конверсии тяжёлых углеводородов дизельного топлива в водородсодержащий синтез-газ на основе нагрева топлива для его испарения и последующего частичного парциального окисления³. Положительные результаты были достигнуты благодаря разработанной Институтом катализа оригинальной технологии производства сетчатых катализаторов, выполненных в виде трубчатой конструкции и содержащих сетку из жаропрочной стали с нанесёнными на неё слоями катализатора, причём для формирования слоя в виде оксида алюминия используется свойство образования гидроксида алюминия из растворов алюмината натрия⁴.

³ Porsin A., Kulikov A., Dalyuk I. et al. Catalytic reactor with metal gauze catalysts for combustion of liquid fuel // *Chemical Engineering Journal*. 2015. № 282. P. 233–240.

⁴ Шефер К.И., Мороз Э.М., Рогожников В.Н. и др. Состав оксидных соединений, нанесённых на металлическую сетку при синтезе

Алюминатные растворы представляют собой растворы солей одноосновной метаалюминиевой кислоты, подвергающейся гидролизу, при котором в осадок выделяется кристаллическая гидроокись алюминия. В данном случае путём подбора специальных режимов слой гидроксида алюминия формировался на поверхности предварительно отожжённой жаропрочной сетки, форма которой задавалась в соответствии с геометрической формой каталитического нагревательного элемента. Благодаря разработанной в Институте катализа технологии при изготовлении каталитических нагревательных элементов сетчатым катализаторам может быть придана любая форма поверхности. Данная технология позволяет получать слои оксида алюминия толщиной от нескольких микрон до нескольких десятков микрон. Затем на образованный слой оксида алюминия путём пропитки раствором платинохлористоводородной кислоты, сушки при 100 °С и термического восстановления в атмосфере воздуха при температуре 500 °С наносился слой платины⁵.

В макетном образце каталитического устройства для конвертации дизельного топлива в синтез-газ для разогрева катализатора перед подачей жидкого топлива использовалась пропан-бутановая газовая смесь, но в настоящее время разработаны и другие, более простые способы выведения каталитического элемента на требуемый температурный режим. В результате испытаний макетного образца было установлено, что каталитические процессы получения водород-

катализаторов окисления углеводородов // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2016. Т. 80. С. 1525–1528.

⁵ Там же.

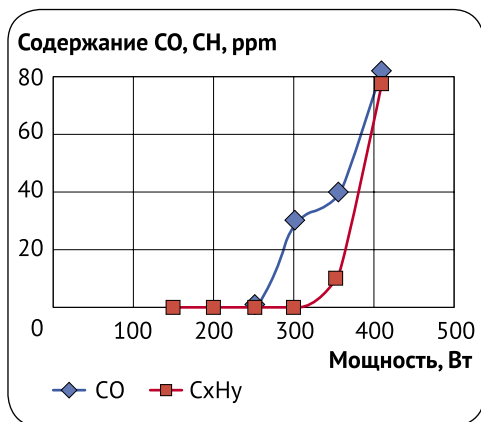


Рис. 1. Изменение содержания загрязнителей в отходящих газах каталитического конвертора в зависимости от мощности

Таблица

Состав отходящих газов каталитического конвертора

Соединение	Объёмная доля (%) для различных режимов подачи	
	Режим 1 (10.5 л/мин)	Режим 2 (7 л/мин)
H ₂	9.4	4.6
O ₂	12.5	14.1
N ₂	75.6	80.2
CH ₄	2.4	1.1

содержащего газа целесообразны с точки зрения получения экологического эффекта в определённом диапазоне мощности каталитического конвертора (рис. 1). Объёмные доли различных веществ в отходящих газах каталитического конвертора зависят от уровня подачи испаренного дизельного топлива (табл.).

Присутствие сопутствующих газов не является препятствием для практического применения бортовых генераторов (конверторов) синтез-газа транспортных средств, поскольку при подаче во впускной коллектор дизельного двигателя они, наряду с составляющими атмосферного воздуха и иных компонентов синтез-газа, подвергнутся окислению в камерах сгорания.

Параллельно с испытаниями каталитических конверторов проводились экспериментальные исследования влияния подачи синтез-газа на топливно-экономические и экологические показатели различных типов

дизельных двигателей, в результате которых установлено⁶:

- подача водородсодержащего синтез-газа во впускной коллектор дизеля в нагрузочных режимах снижает температуру отработавших газов и содержание вредных веществ в отработавших газах, в том числе: окиси углерода, ароматических углеводородов, окислов азота и твёрдых сажевых частиц;

- особенно важным следует считать резкое снижение уровня содержания в отработавших газах двигателей ароматических углеводородов, являющихся сильнейшими канцерогенами, и снижение выбросов входящего в состав парниковых газов углекислого газа при работе дизеля в диапазоне оптимальных значений подачи водородсодержащего газа;

⁶ Глушков С.П., Кочергин В.И., Красников В.В. Влияние добавок водородсодержащего синтез-газа на технико-экономические показатели дизельных двигателей // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2017. № 1–2. С. 130–134.

– применение добавок водородсодержащего топлива для энергетических установок с дизельными двигателями является нецелесообразным в режимах холостого хода;

– наиболее заметное улучшение внешних характеристик дизельных энергетических установок отмечается в случае подачи синтез-газа, содержащего от 3 до 5% водорода от массы дизельного топлива, а максимальная рекомендуемая величина добавки водорода к основному (жидкому) топливу в составе подаваемого во впускной коллектор синтез-газа составляет 10% по массе от суммарного расхода основного топлива, в том числе отмечается существенное увеличение мощности (рис. 2);

– добавка водородсодержащего синтез-газа во впускной коллектор дизельного двигателя внутреннего сгорания стандартного конструктивного исполнения позволяет существенно снизить потребление топлива даже с учётом необходимого потребления топлива на производство водородсодержащего син-

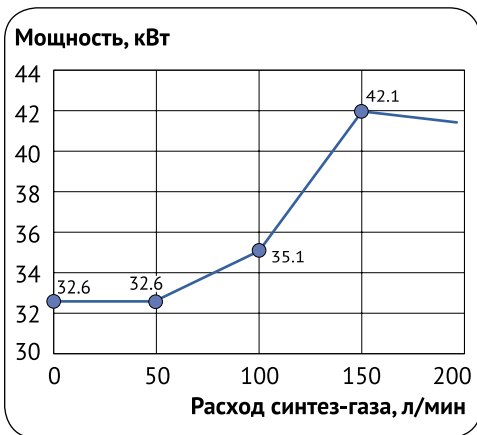


Рис. 2. Изменение мощности дизельного двигателя Д-240 при изменении величины подачи синтез-газа

тез-газа (рис. 3), что обусловлено повышением суммарной теплотворной способности рабочей смеси, состоящей из жидкого дизельного топлива и синтез-газа (рис. 4).

Протекание реакций парциального (мягкого) окисления, в отличие от полного (глубокого) окисления, предполагает конвертацию органи-

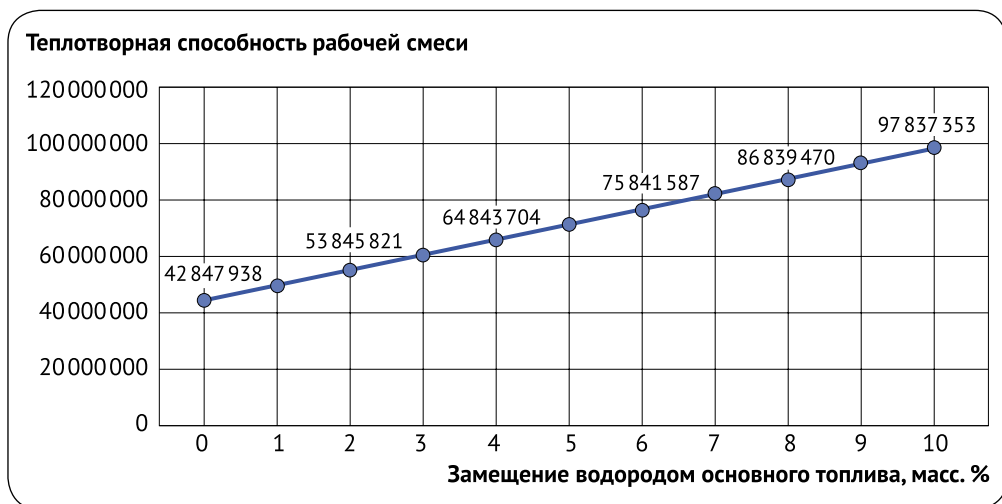


Рис. 3. Расчётное изменение теплотворной способности 1 кг рабочей смеси дизельного топлива и водородсодержащего синтез-газа

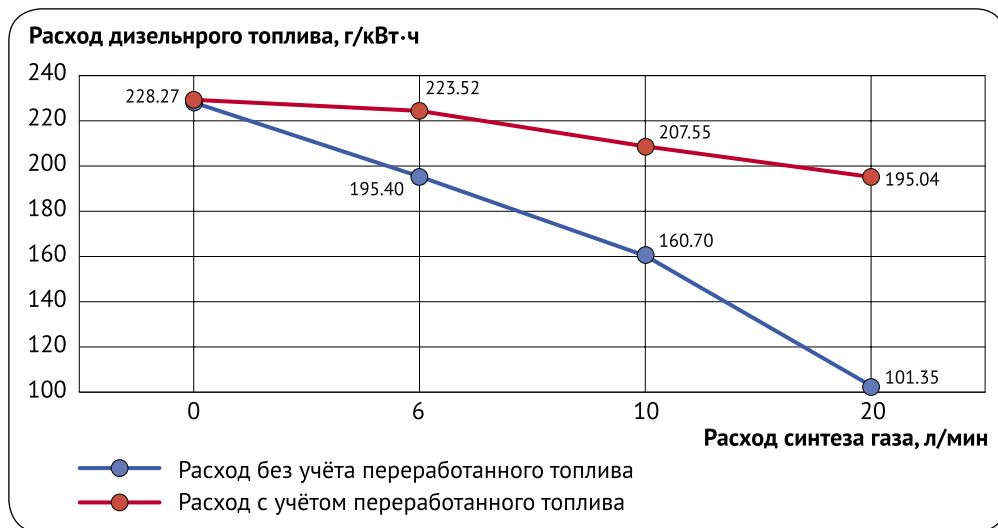


Рис. 4. Изменение расхода топлива дизель-генераторной установки BCH-7Д при работе в нагрузочном режиме

ческих молекул углеводородного топлива в продукты промежуточного окисления. Проведённые исследования перспектив применения каталитической конверсии жидкого дизельного топлива в водородсодержащий синтез-газ методом парциального окисления в целом привели к положительным итогам. Однако ресурсные испытания прототипа каталитической системы конвертирования показали, что существует ряд проблем, усложняющих достижение немедленных и эффективных результатов практической реализации данных процессов. Это связано со сложностью поддержания и своевременного регулирования температурного режима катализатора, в том числе с необходимостью своевременного отвода тепла во избежание деградационных процессов в виде спекания активных компонентов катализатора под воздействием высоких температур. Кроме того, большинство отечественных сортов дизельного топлива могут содержать значительное

количество серы, являющейся каталитическим ядом. Существует иной перспективный метод получения водородсодержащего синтез-газа из дизельного топлива на основе автотермической паровоздушной конверсии, лишённой большинства недостатков парциального окисления. В этом случае риформинг углеводородов, по сути, протекает в две стадии: сначала происходит частичная паровая конверсия углеводородов (преимущественно в метан) и затем выполняется конверсия метана, приводящая к получению водорода и окислов углерода. Автотермический риформинг представляет собой комбинацию процессов парового риформинга и парциального окисления, что позволяет привести общую энтальпию осуществляемых реакций практически к нулю⁷.

⁷ Шилов В.А., Потёмкин Д.И., Бурматова М.А. и др. Разработка дизельного топливного процессора и оптимизация тепловой схемы энергоустановки на основе ТОТЭ мощностью 1 кВт // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2024. Т. 32. № 3. С. 335–342.

Анализ имеющихся разработок в области использования дизельных топливных процессоров, использующих принцип паровоздушной конверсии, для организации систем питания топливом энергетических установок показал, что производство и подача перегретого водяного пара на борту транспортного средства является сложно реализуемым процессом, ставящим под сомнение эффективность применения данного метода получения синтез-газа в транспортной отрасли. Поэтому в ближайшее время с учётом относительно невысокой стоимости предлагаемой конструкции каталитических элементов наиболее целесообразным является разработка практического применения и совершенствование устройств, обеспечивающих подачу добавок водородсодержащего газа к дизельному топливу на основе методов частичного парциального окисления.

Для обеспечения работы энергетических установок транспортных средств с улучшенными экологическими и топливно-экономическими характеристиками бортовой генератор синтез-газа в этом случае должен содержать следующие основные узлы:

- систему подачи и дозирования дизельного топлива;
- систему подачи воздуха под избыточным давлением во избежание обратных всплесков водорода;
- каталитический конвертор с системой испарения дизельного топлива и разогрева катализатора;

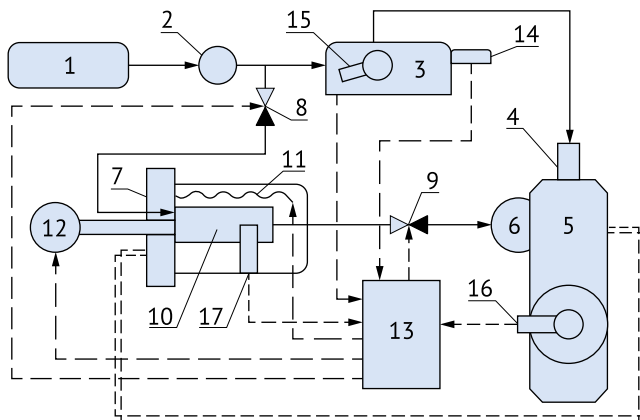


Рис. 5. Схема системы питания топливом дизельного двигателя с подачей водородсодержащего синтез-газа во впускной коллектор:

- 1 – топливный бак; 2 – топливоподкачивающий насос;
- 3 – топливный насос высокого давления;
- 4 – топливные форсунки; 5 – ДВС; 6 – впускной коллектор;
- 7 – теплообменник; 8 – клапан-дозатор; 9 – впускной клапан;
- 10 – каталитический конвертор; 11 – испаритель; 12 – нагнетатель воздуха;
- 13 – блок управления подачей синтез-газа; 14 – датчик положения рейки топливного насоса;
- 15 – датчик положения органа управления подачей топлива; 16 – датчик частоты вращения коленчатого вала двигателя;
- 17 – датчик температуры каталитического элемента

– систему охлаждения каталитического конвертора;

– систему автоматического управления и регулирования уровня подачи водородсодержащего синтез-газа.

На рис. 5 представлена принципиальная схема предлагаемой системы питания топливом дизельного двигателя внутреннего сгорания (ДВС) с подачей водородсодержащего синтез-газа во впускной коллектор. Система питания водородсодержащим топливом работает следующим образом. После запуска двигателя сигнал от датчика частоты вращения коленчатого вала поступает в блок управления подачей конвертированного топлива, который подаёт питание на электрический нагревательный элемент испарителя. В режиме холодного пуска включается

нагнетатель воздуха и производится дозирование воздуха посредством управления электродвигателем нагнетателя. Затем производится кратковременный разогрев катализатора до рабочей температуры, величина которой зависит от типа используемого катализатора, до уровня готовности к последующему переходу к каталитической конверсии дизельного топлива и подаче продуктов реакции во впускной коллектор двигателя. Система разогрева катализатора и первоначального испарения дизельного топлива работает на основе использования нити накала с электропитанием. В период разогрева каталитического элемента каталитического конвертора до рабочей температуры двигатель полностью работает на жидком дизельном топливе.

При переходе двигателя в нагрузочный режим увеличивается частота вращения коленчатого вала и, соответственно, регулятор частоты вращения топливного насоса высокого давления перемещает рейку топливного насоса в сторону увеличения подачи жидкого топлива в камеры сгорания ДВС посредством форсунок-распылителей. Блок управления подачей конвертированного топлива, получая соответствующие сигналы от датчика положения органа управления подачей топлива, датчика положения рейки топливного насоса высокого давления и датчика температуры каталитического элемента, при достижении рабочей температуры катализатора подаёт питание на клапан-дозатор дизельного топлива, впускной клапан и нагнетатель воздуха. В итоге производится совместная работа двигателя с подачей традиционного дизельного топлива и частичной его заменой

путём подачи во впускной коллектор водородсодержащего синтез-газа. Регулятор частоты вращения дизеля при этом, реагируя на увеличение частоты вращения коленчатого вала, уменьшает подачу основного жидкого топлива и обеспечивает повышение энергетической эффективности ДВС.

При работе двигателя в режиме холостого хода прекращается подача в генератор синтез-газа исходных компонентов воздуха и топлива и, соответственно, прекращается выработка водородсодержащего газа, при этом поддерживается рабочая температура каталитического элемента и обеспечивается готовность к конвертации синтез-газа при работе под нагрузкой. При полной остановке двигателя отключается питание нагнетателя воздуха и нагревательного элемента испарителя генератора синтез-газа. В случае достижения критической температуры катализатора подача исходных компонентов прекращается до момента охлаждения рабочих блоков катализатора до необходимого уровня.

Предлагаемый способ организации питания топливом дизельных двигателей внутреннего сгорания позволит использовать добавки водородсодержащего синтез-газа и добиться снижения содержания вредных веществ в отработавших газах и величины расхода топлива с минимальными конструктивными изменениями энергетических установок. Подача во впускные коллекторы двигателей водорода в составе синтез-газа в необходимых для эффективного использования при конкретном нагрузочном режиме работы пропорциях может способствовать обеспечению эффективно-го и безопасного плавного перехода к водородной энергетике.