

Раздел 1. АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТА

УДК 629.113

Подзноев Г. П., Абдулгазис У. А., Дроботюк Н. И.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ ТЕПЛОТЫ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДЛЯ КАТАЛИТИЧЕСКОГО РИФОРМИНГА ЭМУЛЬГИРОВАННЫХ ВОДОЙ МОТОРНЫХ ТОПЛИВ

Аннотация. Проведены термодинамические исследования возможности использования теплоты отработавших газов в поршневых двигателях внутреннего сгорания для предварительного каталитического риформинга эмульгированного водой дизельного топлива в теплообменном реакторе. Расчетным путем установлены основные характеристики химической трансформации смеси дизельного топлива и воды при термическом воздействии на него тепловой энергии. Полученные результаты свидетельствуют о термодинамической возможности значительного повышения энергопотенциала продуктов риформинга, позволяющего существенно снизить расход углеводородной составляющей автомобильного топлива.

Ключевые слова: термодинамика, поршневые двигатели, теплота отработавших газов, водо-эмульгированное дизельное топливо, каталитический риформинг.

Подзноев Г. П., Абдулгазис У. А., Дроботюк М. И.

ТЕРМОДИНАМІЧНА МОЖЛИВІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ В ПОРШНЕВИХ ДВИГУНАХ ТЕПЛОТИ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ ДЛЯ КАТАЛІТИЧНОГО РИФОРМІНГУ ЕМУЛЬГОВАНИХ ВОДОЮ МОТОРНИХ ПАЛИВ

Анотація. Проведено термодинамічні дослідження можливості використання теплоти відпрацьованих газів поршневого двигуна для попереднього каталітичного риформінгу емульгованому водою дизельного палива в теплообмінному реакторі. Розрахунковим шляхом встановлено основні характеристики хімічної трансформації суміші дизельного палива й води при термічному впливі на нього теплової енергії. Отримані результати свідчать про термодинамічні можливості значного підвищення енергопотенціалу продуктів риформінгу, що дозволяє істотно знизити витрату вуглеводневої складової автомобільного палива.

Ключові слова: термодинаміка, поршневі двигуни, теплота відпрацьованих газів, емульговане водою дизельне паливо, каталітичний риформінг.

Podznoev G. P., Abdulgazis U. A., Drobotyuk N. I.

THERMODYNAMIC POSSIBILITY OF USING THE HEAT OF EXHAUST GASES IN PISTON ENGINES FOR THE CATALYTIC REFORMING OF EMULSIFIED WATER MOTOR FUELS

Summary. A thermodynamic study of the possibility of using heat from exhaust gases of a piston engine for catalytic reforming of the diesel fuel emulsified with water in a heat exchange reactor is held. Calculation showed the main characteristics of chemical transformation of the mixture of diesel fuel and water if exposed to thermal heat. The results suggest the thermodynamic possibility of a significant increase in energy potential of reformat, which can significantly reduce the consumption of hydrocarbon component of motor fuel.

Thus the authors proposed a schematic diagram of a reciprocating engine with heat exchanger catalytic reactor in which, apart from the exhaust heat recovery, thermochemical reforming water-fuel emulsions occur extracting hydrogen to the free phase, thereby increasing the power consumption of reformat.

Key words: thermodynamics, piston engine, exhaust gases heat, diesel fuel emulsified with water, catalytic reforming.

Постановка проблемы. Энергия – основной ресурс, обеспечивающий существование современной цивилизации, и глобальный спрос на нее стремительно возрастает (около 3% в год) вследствие увеличения численности мирового населения, улучшения качества жизни, развития мировой промышленности, индустриализации разви-

вающихся стран, научно-технического прогресса. При сохранении таких темпов к середине XXI века мировой энергобаланс может возрасти в 2,5 раза, а к концу века – в 4 раза [1].

Исторически сложилось, что базовой основой энергообеспечения является природное органическое сырье – уголь, нефть и природный

газ. В начале XXI века в мире потреблялось 3,4 млрд. т угля, 3,5 млрд. т нефти и 2,4 трлн. м³ газа, что энергетически эквивалентно 420×10^{12} МДж с удельным годовым потреблением на одного обитателя Земли 18,6 МВт. Из последних лишь 2,1 МВт – полезно потребляемая энергия, а 16,5 МВт – рассеиваемая в окружаемом пространстве в виде тепловых потерь, существенно превосходящих в отдельных местах равновесный фон.

Существенную долю в этот баланс вносит и транспортный сектор с поршневыми двигателями внутреннего сгорания. Вводимая в термодинамическую систему поршневых двигателей теплота расходуется на совершение полезной работы и на изменение внутренней энергии системы. По данным исследований внешнего теплового баланса поршневого двигателя, существенная часть энергии топлива, вводимого в цилиндр, не реализуется в виде работы, а выводится из цикла, обуславливая тем самым соответствующие необратимые потери цикла. Это означает, что в любом случае часть теплоты в системе остается неиспользованной.

В приложении к циклам тепловых двигателей эта неиспользованная теплота выводится в виде горячих отработавших газов и путем теплопередачи через стенки рабочего цилиндра в систему охлаждения двигателя. В дизелях доля потеря энергии топлива, уносимой с отработавшими газами, достигает 40%, что соответствует примерно 17000 кДж (4,7 кВт) на каждый килограмм израсходованного топлива. При ориентировочном количестве автотранспортных средств в пределах одного миллиарда единиц, их годовой выброс CO₂ и CO составляет, соответственно, 4,5 и 0,4 млрд. т или около 15% от общих выбросов CO₂ и до 50% CO. В мегаполисах на долю автотранспорта эти соотношения могут достигать 60% по CO₂ и 90–95% по CO от общего загрязнения атмосферы города, что может привести к превышению ПДК в десятки раз. Сюда следует добавить окислы азота и выбросы химдобавок в топливо [2].

Из сказанного следует, что генеральным направлением дальнейшего развития автотранспортного сектора на данном этапе должна стать как диверсификация энергообеспечения поршневых двигателей, так и повышение полноты использования энергopotенциала традиционного моторного топлива.

Анализ литературы. Одним из направлений снижения указанных выше негативных последствий является повышение коэффициента полезного использования теплоты сгорания моторных топлив в существующих конструкциях поршневых двигателей.

Традиционные способы регенерации теплоты, направленные на снижение тепловых потерь с отработавшими газами, используются в крупных судовых и стационарных силовых установках, в частности на основе применения котлоутилизаторов для получения пара или горячей воды.

На двигателях меньшей размерности, например, автотракторного типа, реализация подобных способов утилизации тепловой энергии отработавших газов практически неосуществима. В двигателях данного типа тепловая энергия газового потока на выходе частично может быть преобразована в работу в сопряженных паровых и газовых турбинах.

В последнее время получают также развитие исследования по разработке утилизационных контуров для силовых установок, работающих по циклу Ренкина.

Также теплота отработанных газов частично используется в дизельных двигателях с турбонаддувом, когда выходящие из цилиндра под избыточным давлением газы вращают крыльчатку турбины и передают энергию совмещенного с ней воздушного компрессора. При этом тепловая энергия трансформируется в механическую и возвращается в виде дополнительного давления на стадии адиабатного сжатия и горения топлива. На это используется около 25% энергии выхлопных газов. Турбонаддув позволяет не только повысить удельную мощность и крутящий момент на 15–20%, но и добиться улучшения топливной экономичности двигателя вследствие более полного сгорания топлива.

Еще одним из путей повышения степени рационального использования теряемой части термодинамической теплоты в двигателе дополнительно к процессу наддува может быть система ее регенерации с подачей непосредственно на стадию горения топлива. Наиболее подходящим для этого теплоносителем может быть обычная вода, характеризующаяся наиболее высокой теплоемкостью в жидкой фазе.

Проведено значительное количество экспериментальных работ [3], показавших, что жидкие эмульгированные водой топлива сгорают быстрее, чем безводные. Вода не ухудшает, а улучшает процессы горения по причине дополнительного дробления капель топлива, увеличения поверхности горения частиц и хорошего перемешивания горючего с воздухом. Сокращение времени сгорания капель благоприятно сказывается на догорании сажистых остатков, так как улучшает полноту сгорания топлива и уменьшает отложение сажи (нагара) на рабочих поверхностях.

Присутствие паров воды значительно снижает температуру газовой фазы при одновременном

возрастании давления, а также препятствует образованию окислов азота. Процессы смесеобразования, воспламенения и горения для обводненного эмульгированного топлива протекают более интенсивно, чем для топлива безводного, и потому они обеспечивают в конечном итоге повышенные показатели сгорания как во времени, так и по полноте.

Более перспективно направление утилизации тепловой энергии отработавших газов (ОГ) на основе использования предварительного термохимического преобразования исходного жидкого топлива в синтез-газ. Сущность подобного способа трансформации заключается в том, что под воздействием тепловой энергии отработавших газов происходит деструкция углеводородных цепочек топлива с образованием более коротких углеводородов и водородной фазы. Тем самым снижается доля внутренней энергии топлива, расходуемая на этот процесс перед его сгоранием в рабочем цилиндре двигателя, облегчаются процессы газосмешения и сгорания, возрастает количество теплоты на совершение полезной работы, уменьшается недогар, снижаются тепловые потери и токсичные выбросы в окружающую среду.

В промышленной практике широко используются процессы каталитического преобразования природных углеводородов нефти и газа для получения широкого спектра продуктов, в том числе и моторных топлив с более приемлемыми энергетическими возможностями.

При температурах выше 1000°C углеводороды полностью распадаются на водород и углерод.

При $700\text{--}800^{\circ}\text{C}$ из жидких углеводородов образуются главным образом более легкие газобразные углеводороды и кокс.

При температурах от 440 до 540°C процесс термодеструкции (крекинг-процесс) ограничивается только простым структурным расщеплением первичных углеводородов на более короткие и легкие фазы, отличающиеся от первоначальных по температурам кипения, удельному весу и другим показателям. Таким образом получают бензин и дизельное топливо с их массовым выходом в пределах $25\text{--}50\%$ от исходного сырья.

Ниже 360°C углеводороды расщепляются только в присутствии катализаторов. При этом значительно возрастает как скорость, так и полнота превращения исходных углеводородов. С большей эффективностью катализаторы действуют на более тяжелые углеводороды. Так, скорость разложения цетана ($\text{C}_{16}\text{H}_{34}$, температура кипения 287°C) почти в 13 раз выше скорости крекинга гептана (C_7H_{16} , температура кипения 98°C).

Крекинг сырья протекает с поглощением тепла, которое называется теплотой реакции крекинга. Эта теплота затрачивается на разрыв связей между атомами молекулы. При обычной глубине разложения сырья теплота реакции каталитического крекинга приблизительно равна 50 большим калориям на один килограмм пропускаемого через реактор сырья. Основным недостатком традиционного крекинга и термовоздушной конверсии в продуктах реакции наряду с H_2 и CO содержится довольно много твердофазного сажистого углерода, который пассивирует активную поверхность катализатора, снижая тем самым эффективность основного процесса.

Среди разнообразных конструкций устройств для газификации моторных топлив в высокооктановый газ следует отметить газификатор фирмы «51етепз», который испытан в стендовых условиях на двигателях. Из низкооктанового прямогонного бензина данный газификатор обеспечивал получение синтез-газа с октановым числом около 108 следующего состава: $4\text{--}6\%$ (об.) H_2 , $8\text{--}19\%$ (об.) CH_4 , $8\text{--}9\%$ (об.) CO , $3,5\text{--}6\%$ (об.) CO_2 и $50\text{--}55\%$ (об.) N_2 с КПД газификатора около 95% . Газификация топлива обеспечивала расширение предела обеднения топливной смеси до $\alpha = 1,45\text{--}1,6$, что в совокупности с другими факторами позволило повысить энергетический КПД двигателей на $10\text{--}15\%$ и снизить выбросы оксидов углерода и азота в $3\text{--}6$ и $1,2\text{--}1,5$ раза, соответственно [4].

Более перспективен в этом отношении вариант использования в процессе каталитического крекинга обычной воды.

В качестве сырья процесса термокаталитической конверсии наибольшее применение получил метанол, что связано с высоким содержанием водорода в этом продукте (свыше 12%), низкой температурой процесса ($200\text{--}300^{\circ}\text{C}$), его высокой энергетической эффективностью и простой организации. Согласно термодинамическим расчетам, в продуктах конверсии водных растворов метанола может содержаться до 70% H_2 . При использовании тепла отработавших газов на каждый моль превращенного метанола утилизируется 75 кДж тепла, благодаря чему теоретический КПД системы газификатор – поршневой двигатель, повышается примерно на 11% .

Паровая конверсия углеводородного моторного топлива в конструктивном отношении более сложная. Это обусловлено необходимостью иметь дополнительную емкость для воды, систему ее подачи и дозирования (рис. 1). Установка включает сырьевой узел, аппарат для конверсии бензина (совмещающий функции реактора), дополнительный реактор для паровой конверсии оксида углерода и аппарат для сероочистки [5].

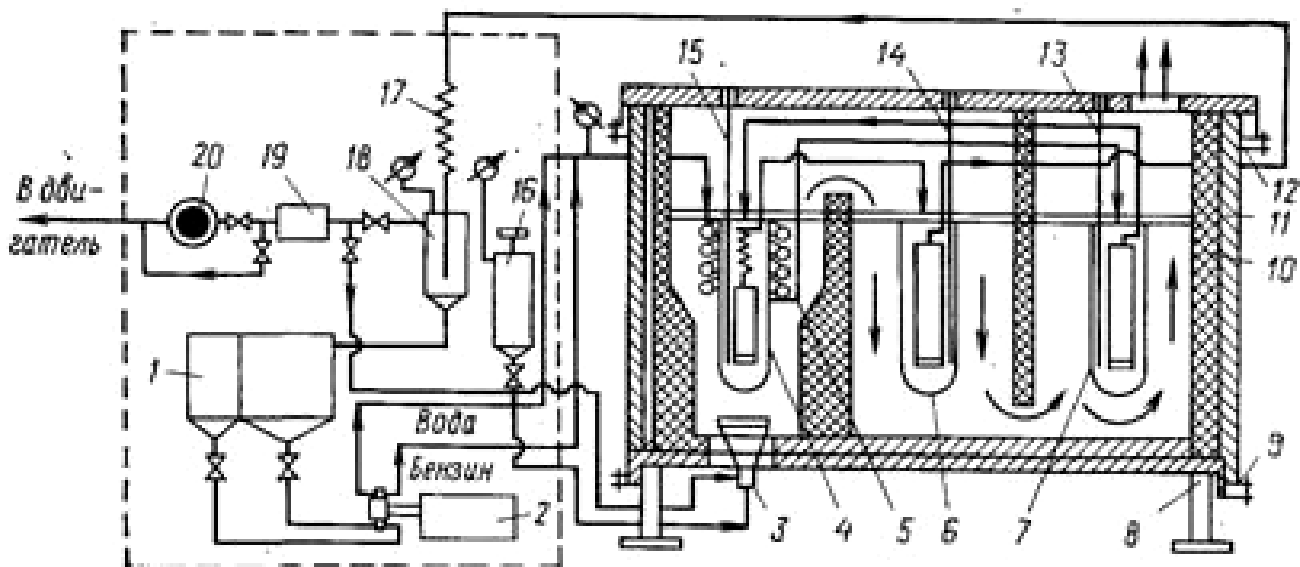


Рис. 1. Схема установки паровой конверсии бензина УКБ-1:

- 1 – бачки бензина и воды; 2 – насос-дозатор; 3 – топочное устройство;
 4 – реактор конверсии бензина; 5 – мезевик; 6 – реактор паровой конверсии CO;
 7 – устройство сероочистки; 8 – стойки; 9, 12 – фиксаторы;
 10 – тепловая изоляция; 11 – корпус; 13–15 – термопары; 16 – ресивер природного газа;
 17 – холодильник-конденсатор; 18 – влагоотделитель; 19 – ротаметр; 20 – регулятор давления.

Производительность данной установки по выходу водорода 35–70% (об.), массовое отношение вода : бензин = 3,4–5,0, температура 300–750°C; масса установки без сырья и катализатора – 75 кг. Выход водорода и производительность процесса растут с повышением температуры и избытка водяного пара. Повышение же давления резко снижает выход водорода в диапазоне 0,5–1,5 МПа от 56,8 до 42,1% (об.).

Таким образом, в существующей научной литературе обосновывается возможность предварительной термической трансформации традиционного моторного топлива на борту автомобиля. При этом источником требуемой теплоты для этого процесса могут служить отработавшие газы.

Цель статьи – путем термодинамического моделирования предварительного термохимического риформинга эмульгированного водой традиционного моторного топлива (бензин и дизель) с использованием теплоты отработавших газов определить основные технологические и параметрические характеристики процесса сгорания продуктов риформинга в типовых рабочих циклах поршневых двигателей.

Изложение основного материала. Одним из путей повышения степени рационального использования теряемой части термодинамической теплоты в двигателе может быть система ее регенерации с топливом. В этом случае не только регенерируется теплота отработавших газов, но и не тратится тепловая энергия сгорания топлива на его предварительный нагрев до кипения и ис-

парение перед сгоранием уже в камере сгорания. Таким образом, улучшается кинетика сгорания топлива и повышается общий КПД цикла Дизеля.

Наиболее подходящим для этого теплоносителем могут быть отработавшие газы, имеющие достаточный тепловой потенциал. В этом случае одним из концептуальных решений является предварительная подача водоэмульгированного топлива топливным насосом высокого давления через каталитический теплообменник, обогреваемый отработавшими газами [6].

За базовую основу приняты варианты идеализированных термодинамических циклов поршневых двигателей с кватированной подачей топлива на один рабочий цикл в условиях стехиометрических соотношений участвующих композиционных составляющих в условной последовательности операций по схеме, изображенной на рис. 2.

Дополнительно перед теплообменником топливо эмульгируется конденсатом паров воды, находящихся в отработавших газах. Присутствие паров воды значительно снижает температуру газовой фазы при одновременном возрастании полезного давления, а также препятствует образованию окислов азота и сажистого углерода.

Результаты многих исследований показали, что процессы смесеобразования, воспламенения и горения для обводненного эмульгированного топлива протекают более интенсивно, обеспечивая в конечном итоге более высокие показатели сгорания как по времени, так и по полноте.

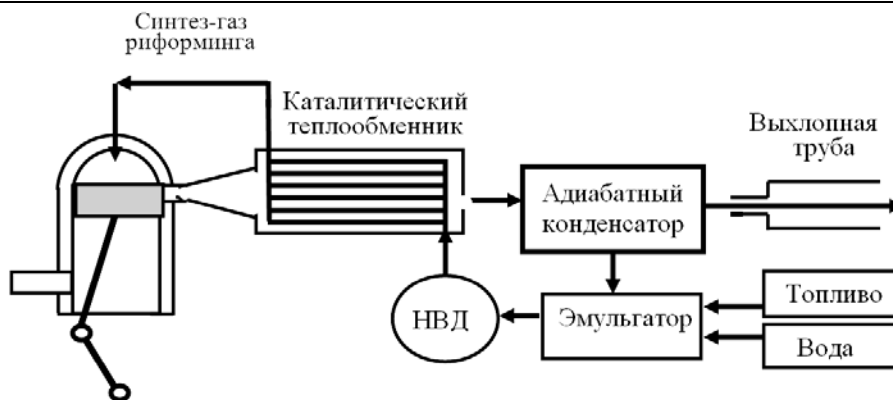


Рис. 2. Принципиальная схема теплообменного каталитического реактора.

Для снятия проблемы расслоения водо-эмульгированного топлива при его хранении или длительной стоянке автомобиля предусмотрено раздельное содержание воды и топлива на борту автомобиля и их совместная дозированная подача через систему эмульгирования и риформинга. Подобный вариант дает возможность подавать в систему воду, предварительно нагретую за счет теплоты отходящих газов, что позволяет осуществить более полную регенерацию теплоты отработавших газов с возвратом ее в основной процесс, поэтому оно готовится при рабочем режиме двигателя.

На выходе из рабочего цилиндра отработавшие газы по газоходу проходят через трубчатый каталитический теплообменник и передают теплоту встречному потоку предварительно эмульгированного водой исходного моторного топлива. После теплообменника парогазовая топливная смесь поступает в рабочий цилиндр двигателя.

Отработавшие газы после теплообменника поступают в адиабатный конденсатор, где пары воды конденсируются до жидкой фазы. Далее конденсат направляется в эмульгатор для смешения конденсата с топливом, и насосом высокого давления смесь подается в каталитический теплообменник. Таким образом, регенерируется также и часть теплоты отработавшей парогазовой фазы, передаваемой конденсату.

Риформинг исходных продуктов протекает с поглощением тепла отработавших газов, которое затрачивается на разрыв связей между атомами углеводородной молекулы. Кроме этого, часть теплоты расходуется также на испарение сырья и нагрев его до рабочей температуры каталитического риформинга.

В идеальном варианте парового риформинга исходного топлива образуется так называемый синтез-газ. В зависимости от условий проведения риформинга процесс может осуществляться по двум основным направлениям:

1) неполный риформинг:



2) полный риформинг:



Получаемый синтез-газ состоит практически из водорода и монооксида (диоксида) углерода с более высокой теплотой сгорания в сравнении с исходными углеводородами, повышенным октановым и цетановым числом и чистым выхлопом при его сгорании. По атомному балансу химических компонентов из вышеприведенных стехиометрических формул следует, что в сравнении с исходным топливом в продуктах риформинга существенно возрастает количество свободного водорода: почти в два раза при неполном варианте и почти в 3,9 раза при полном риформинге. Причем во втором варианте идеализированного процесса теплоносителем становится практически только энергетически и экологически более эффективный водород. Кроме того, получаемый таким образом синтез-газ выходит из каталитического реактора и поступает в рабочий цилиндр поршневого двигателя с температурой отработавших газов, входящих в теплообменник. То есть часть теплоты возвращается обратно к началу процесса.

В качестве исходных данных сравнительного термодинамического анализа принята квота единичного заряда дизельного топлива (на примере гептана $C_{15}H_{32}$) в 0,2; 0,15 и 0,1 г на один рабочий цикл с объемом рабочей камеры 3,0 дм³ (табл. 1–5).

Таблица 1.

Расчет материального баланса процесса горения топлива в традиционном идеальном цикле Дизеля.

| | $C_{15}H_{32}$ | $23O_2$ всего | N_2 | Сумма | $15CO_2$ | $16H_2O$ | N_2 | O_2 избыток | Сумма |
|---|----------------|------------------|--------|--------|----------|----------|--------|------------------|--------|
| Мольная масса, г | 212 | 736 | | 948 | 660 | 288 | | | 948 |
| Масса, г | 0,2 | 0,82472 | 2,7139 | 3,5386 | 0,6226 | 0,2717 | 2,7139 | 0,1304 | 3,7386 |
| Тепловой эффект сгорания единичного заряда 0,2 г дизельного топлива +8882,07 Дж | | | | | | | | | |

Таблица 2.

Стехиометрический расчет неполного каталитического риформинга $C_{15}H_{32} + 15H_2O = 15CO + 31H_2$.

| | $C_{15}H_{32}$ | $15H_2O_{ж}$ | Сумма | $15CO$ | $31H_2$ | Сумма |
|---|----------------|--------------|---------|---------|---------|---------|
| Мольная масса, г | 212 | 270 | 482 | 420 | 62 | 482 |
| Масса, г | 0,2 | 0,25472 | 0,45472 | 0,39623 | 0,05849 | 0,45472 |
| | 0,15 | 0,19104 | 0,34104 | 0,29717 | 0,04387 | 0,34104 |
| | 0,1 | 0,12736 | 0,22736 | 0,19811 | 0,02925 | 0,22736 |
| Тепловой эффект риформинга 0,2 г – 2814,0 Дж 0,15 г – 2110,32 Дж 0,1 г – 1406,98 Дж | | | | | | |

Таблица 3.

Стехиометрический расчет полного каталитического риформинга $C_{15}H_{32} + 30H_2O = 15CO_2 + 46H_2$.

| | $C_{15}H_{32}$ | $30H_2O_{ж}$ | Сумма | $15CO_2$ | $46H_2$ | Сумма |
|--|----------------|--------------|--------|----------|---------|--------|
| Мольная масса, г | 212 | 540 | 752 | 660 | 92 | 752 |
| Масса, г | 0,2 | 0,5094 | 0,7094 | 0,6226 | 0,0868 | 0,7094 |
| | 0,15 | 0,3821 | 0,5321 | 0,4670 | 0,0651 | 0,5321 |
| | 0,1 | 0,2547 | 0,3547 | 0,3113 | 0,0434 | 0,3547 |
| Тепловой эффект риформинга 0,2 г – 2853,87 Дж 0,15 г – 2140,25 Дж 0,1 г – 1426,93 Дж | | | | | | |

Таблица 4.

Стехиометрический расчет материального баланса сгорания продуктов неполного риформинга моторного топлива.

| | | $15CO$ | $31H_2$ | $23O_2$ | N_2 | Σ | $15CO_2$ | $31H_2O_{г}$ | N_2 | Σ |
|--------------------------------------|------|--|---------|---------|---------|------------------------------------|--|--------------|---------|----------|
| Мольная масса, г | | 420 | 62 | 736 | | 1218 | 660 | 558 | | 1218 |
| Масса, г | 0,2 | 0,39623 | 0,05849 | 0,69435 | 2,25595 | 3,40502 | 0,62265 | 0,52642 | 2,25595 | 3,40502 |
| | 0,15 | 0,29717 | 0,04387 | 0,52076 | 1,69195 | 2,55375 | 0,46698 | 0,39481 | 1,69195 | 2,55374 |
| | 0,1 | 0,19811 | 0,02925 | 0,34716 | 1,12793 | 1,70245 | 0,31132 | 0,26320 | 1,12793 | 1,70245 |
| Тепловой эффект сгорания синтез-газа | | +11078,27 Дж/0,2 г $C_{15}H_{32}$ +8311,02 Дж/0,15 г $C_{15}H_{32}$ +5533,09 Дж/0,1 г $C_{15}H_{32}$ | | | | Теплосодержание отработавших газов | +5966,0 Дж/0,2 г $C_{15}H_{32}$ +4154,0 Дж/0,15 г $C_{15}H_{32}$ +2510,8 Дж/0,1 г $C_{15}H_{32}$ | | | |

Таблица 5.

Стехиометрический расчет материального баланса сгорания продуктов полного риформинга моторного топлива.

| | | $15CO_2$ | $46H_2$ | $23O_2$ | N_2 | Σ | $46H_2O$ | N_2 | $15CO_2$ | Σ |
|--------------------------------------|------|---|---------|---------|---------|------------------------------------|--|---------|----------|----------|
| Мольная масса, г | | 660 | 92 | 736 | | 1488 | 828 | | 660 | 1488 |
| Масса, г | 0,2 | 0,62264 | 0,08679 | 0,69434 | 2,25593 | 3,65970 | 0,78113 | 2,25593 | 0,62264 | 3,65970 |
| | 0,15 | 0,46698 | 0,06509 | 0,52075 | 1,69193 | 2,74475 | 0,58585 | 1,69193 | 0,46698 | 2,74476 |
| | 0,1 | 0,31132 | 0,04340 | 0,34717 | 1,12796 | 1,82985 | 0,39057 | 1,12796 | 0,31132 | 1,82985 |
| Тепловой эффект сгорания синтез-газа | | +10494,7 Дж/0,2 г $C_{15}H_{32}$ +7871,9 Дж/0,15 г $C_{15}H_{32}$ +5247,9 Дж/0,1 г $C_{15}H_{32}$ | | | | Теплосодержание отработавших газов | +5673,4 Дж/0,2 г $C_{15}H_{32}$ +3951,3 Дж/0,15 г $C_{15}H_{32}$ +2423,5 Дж/0,1 г $C_{15}H_{32}$ | | | |

Из приведенных в табл. 1–5 результатов термодинамических расчетов можно сделать определенные заключения.

1. Теплосодержания отработавших газов в идеализированном цикле более чем достаточно для термокаталитического риформинга эмульгированного дизельного топлива и его превращения в синтез-газ.

2. Получаемый в результате термокаталитического риформинга синтез-газ выходит из риформера и подается в рабочую камеру двигателя с температурой отработавших газов и давлением, создаваемым насосом высокого давления при

подаче эмульгированного водой топлива перед теплообменным риформером.

3. Подача нагретого синтез-газа в рабочий цилиндр двигателя значительно улучшает кинетику его сгорания в сравнении с жидким первичным дизтопливом, на испарение которого и предварительный разрыв химических связей углеводородных структур затрачивается время и часть располагаемой теплоты, исключаемой из последующего выполнения работы адиабатного расширения.

4. В варианте полного каталитического риформинга эмульгированного водой традицион-

ного моторного топлива генерируется синтез-газ, содержащий в качестве энергоносителя только молекулярный водород, высвобождающийся как из углеводородной части, так и из стехиометрической доли воды, что дополнительно повышает энергопотенциал синтез-газа.

Тем самым, соответственно, повышается и количество вводимой в процесс потенциальной энергии

как за счет опосредованного реверса теплоты отработавших газов, так и за счет высвобождения водорода воды в самостоятельную фазу.

Итоговые сравнительные данные термодинамического моделирования процесса термокаталитического риформинга эмульгированного водой дизельного топлива с использованием теплоты отработавших газов отражены в табл. 6.

Таблица 6.

Технологические и параметрические характеристики идеализированного цикла Дизеля с каталитическим риформингом эмульгированного водой дизельного топлива.

| Параметры цикла* | Традиционный цикл (0,2 г C ₁₅ H ₃₂) | Неполный каталитический риформинг (C ₁₅ H ₃₂) | | | Полный каталитический риформинг (C ₁₅ H ₃₂) | | |
|---------------------------|--|--|-----------------|----------|--|-----------------|----------|
| | | 0,2 г | 0,15 г | 0,1 г | 0,2 г | 0,15 г | 0,1 г |
| $Q_{\text{риф}}$, Дж | – | –2814,96 | –2110,32 | –1406,98 | –2853,87 | –2140,25 | –1426,93 |
| $Q_{\text{сгор}}$, Дж | +7843,36 | +11078,27 | +8311,02 | +5533,09 | +10494,7 | +7871,9 | +5247,9 |
| $Q_{\text{син-газ}}$, Дж | – | 516,2 | 384,2 | 255,8 | 758,4 | 536,9 | 383,2 |
| Q_1 , Дж | +7843,36 | 11594,47 | 8695,22 | 5788,89 | 11253,1 | 8408,8 | 5631,1 |
| $P_{2,3} \times 10^5$ Па | 48,8 | 48,8 | 48,8 | 48,8 | 48,8 | 48,8 | 48,8 |
| T_2 , К | 855,2 | 855,2 | 855,2 | 855,2 | 855,2 | 855,2 | 855,2 |
| T_3 , К | 2466 | 2891,5 | 2527,2 | 2082,6 | 2659,6 | 2355,7 | 1985 |
| $P_4 \times 10^5$ Па | 4,7 | 6,0 | 4,8 | 3,6 | 5,3 | 4,4 | 3,4 |
| T_4 , К | 1400,1 | 1783 | 1444,9 | 1071,1 | 1593,5 | 1314,8 | 1005,5 |
| Q_2 , Дж | 3747,2 | 5966,0 | 4154,0 | 2510,8 | 5673,4 | 3951,3 | 2423,5 |
| Q_3 , Дж | 3747,2 | 3151,04 | 2043,68 | 1103,82 | 2819,87 | 1811,05 | 996,57 |
| η_t | 0,522 | 0,485 | 0,522 | 0,566 | 0,496 | 0,53 | 0,57 |
| η_q | 0,522 | 0,728 | 0,765 | 0,809 | 0,749 | 0,785 | 0,823 |
| A , Дж | 4094,2 | 5623,3 | 4538,9 | 3276,5 | 5581,5 | 4456,7 | 3209 |

*Примечания: $Q_{\text{риф}}$ – теплота, расходуемая на термориформинг эмульгированного водой моторного топлива;
 $Q_{\text{сгор}}$ – теплота сгорания топлива;
 $Q_{\text{син-газ}}$ – теплосодержание синтез-газа после риформера;
 Q_1 – общая располагаемая теплота сгорания синтез-газа в рабочем цилиндре;
 $P_{2,3}$ – давление после адиабатного сжатия и изобарного сгорания;
 T_2 – температура воздуха после адиабатного сжатия;
 T_3 – температура изобарного сгорания топлива;
 P_4 – давление в рабочем цилиндре в конце адиабатного расширения;
 T_4 – температура газов в конце адиабатного расширения;
 Q_2 – теплосодержание отработавших газов в конце адиабатного расширения;
 Q_3 – теплосодержание отработавших газов после теплообменного риформера;
 η_t – термический КПД идеализированного термодинамического цикла;
 η_q – коэффициент полезного использования располагаемой теплоты;
 A – полезная работа идеализированного термодинамического цикла.

Данные табл. 6 позволяют выделить следующие особенности.

1. Для всех рассмотренных вариантов неизменным принимался процесс адиабатного сжатия воздуха в рабочем цилиндре, принятом при обычном для дизельного двигателя коэффициенте сжатия 15–22.

2. Теплосодержание синтез-газа ($Q_{\text{син-газ}}$) после риформинга принималось при температуре отработавших газов с учетом индивидуальных теплоемкостей его компонентов.

3. Общая теплота (Q_1), вводимая в процесс, определялась как сумма низшей теплоты сгорания синтез-газа ($Q_{\text{сгор}}$) при стандартных условиях и его теплосодержания после риформера ($Q_{\text{син-газ}}$).

4. При равенстве единичного массового заряда в идеализированном цикле существенно возрастают количество располагаемой теплоты, температура изобарного сгорания, температура и теплосодержание отработавших газов и полезная работа при относительно сниженном термическом КПД. Шаговое снижение относительно традиционного Дизеля величины заряда для вариантов неполного и полного риформинга исходного топлива приводит, с одной стороны, к поступательному снижению основных параметрических и технологических характеристик, с другой – к возрастанию термического КПД. Причем эти снижения имеют большую величину для полного риформинга.

В вариантах идеализированных циклов Дизеля, условно приближенных по количеству получаемой работы, последние характеризуются следующими особенностями (см. табл. 7):

- экономия исходного дизельного топлива составляет 35% для неполного риформинга и 32,5% – для полного;
- температура в конце изобарного сгорания снижается на 106°С для неполного и на 211,4°С – для полного риформинга;

- соответственно, температура отработавших газов снижается на 100°С для неполного риформинга и 173°С – для полного;
- количество теплоты, выводимое из цикла в окружающую среду снижается на 56,1% для неполного и 58,6% для полного риформинга;
- соответственно, коэффициент полезного использования располагаемой теплоты цикла возрастает в 1,5 раза для неполного и в 1,52 раза – для полного риформинга.

Таблица 7.

Интерполированные варианты каталитического риформинга, условно приближенные к традиционному идеализированному циклу Дизеля по совершаемой работе.

| | $m, \text{ г}$ | $A, \text{ Дж}$ | $Q_{\text{риф}}$ | $Q_{\text{сгор}}$ | $Q_{\text{син-газ}}$ | Q_1 | $T_3, \text{ К}$ | $T_4, \text{ К}$ | Q_2 | Q_3 | η_t | η_q |
|---|----------------|-----------------|------------------|-------------------|----------------------|---------|------------------|------------------|--------|--------|----------|----------|
| 1 | 0,2 | 4094,2 | – | 7843,36 | – | 7843,36 | 2466,0 | 1400,1 | 3747,2 | 3747,2 | 0,522 | 0,522 |
| 2 | 0,13 | 4060,5 | 1829,32 | 7200,41 | 333,0 | 7533,41 | 2360,4 | 1299,5 | 3473,8 | 1644,5 | 0,539 | 0,782 |
| 3 | 0,135 | 4085,2 | 1931,52 | 7084,1 | 483,2 | 7567,3 | 2254,6 | 1227,0 | 3481,3 | 1549,8 | 0,540 | 0,795 |

1 – вариант традиционного идеализированного цикла Дизеля;
 2 – вариант идеализированного цикла Дизеля с неполным каталитическим риформингом;
 3 – вариант идеализированного цикла Дизеля с полным каталитическим риформингом.

Выводы.

1. Теплоты отработавших газов термодинамически более чем достаточно для осуществления как полного, так и неполного каталитического термориформинга дизельного топлива.

2. При риформинге эмульгированного водой моторного топлива получаемый синтез-газ обогащается свободной водородной фазой за счет разложения воды, повышая тем самым свой энергopotенциал, включая и теплоту отработавших газов на выходе из теплообменного риформера.

3. Получаемый при риформинге синтез-газ имеет более высокие характеристики по кинетике сгорания в сравнении с традиционным жидким дизельным топливом, без недогара и окислов азота.

4. При сгорании синтез-газа снижается термическая составляющая в камере сгорания за счет увеличения паров воды.

5. Наиболее важным является существенное (на 30–35%) снижение расхода моторного топлива при получении адекватной работы двигателя, что весьма актуально в ситуации неуклонного возрастания стоимости углеводородных энергоносителей.

6. Не менее важно для экологии существенное снижение токсичности отработавших газов и тепловых выбросов в окружающую среду.

В дальнейшем планируется проведение опытно-экспериментальных исследований каталитического риформинга в стендовых условиях для оптимизации основных параметрических и технологических характеристик процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тенденции и риски развития мировой энергетики [Электронный ресурс]. – Режим доступа : escoccosys.narod.ru/2011_6/art067.
2. Термохимическая регенерация энергии отработавших газов [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.mami.ru/science/autotr.2009/scientific/article/s02/s02_01.pdf.
3. Коняев Е. А. Каталитический риформинг [Электронный ресурс] / Е. А. Коняев. – Режим доступа : www.aurally.ru/pravo/3117/index.html?
4. Риформинг [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.himi.oglib.ru/bgl/702/277.html.
5. Продукты газификации [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.potram.ru/tehnology7.doc.
6. Эмульгирование [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.dobi.oglib.ru/bgl/6380/706.html.