

УДК 621.438

DOI: 10.15587/1729-4061.2019.174061

Исследование утилизации отработавших газов ДВС с использованием расширительной машины и конверсии топлива

А. С. Митрофанов, А. С. Познанский, А. Ю. Проскурин, Ю.В. Шабалин

Розроблена схема енергетичної установки на базі двигуна внутрішнього згорання ІЧ 6,8/5,4 з іскровим запаленням та двохступеневої системи утилізації тепла відпрацьованих газів. Підібрано основні елементи першої та другої ступені системи утилізації. У якості першої ступені використано роторно-поршневу розширювальну машину, а у якості другої ступені конверсію палива.

Проведено дослідження ефективних параметрів двигуна ІЧ 6,8/5,4 з системою глибокої двохступеневої утилізації тепла відпрацьованих газів на різних режимах роботи. Отримано залежності зміння питомої ефективної витрати палива від потужності енергетичної установки при використанні тільки конверсії палива та в поєднанні з розширювальною машиною.

Отримано залежності параметрів роботи роторно-поршневого двигуна від витрати робочого тіла. Визначено температури робочих тіл в реакторі та теплову потужність відпрацьованих газів в залежності від навантаження двигуна, а також необхідну кількість енергії для перетворення етанолу в синтез-газ. Отримано залежності ступеня конверсії етанолу від температури реакції та масової витрати через реактор. Визначена залежність питомої теплоти хімічної реакції від ступеня конверсії.

Встановлено, що при досягненні повної конверсії за реакцією розкладання весь рідкий етанол повністю перетворюється в горючий синтез-газ, основними компонентами якого є водень, оксид вуглецю та метан. Розрахункова питома нижча теплота згорання синтез-газу складає 28,79 МДж/кг. Для отримання 1 кг синтез-газу витрачається 4,0 МДж теплової енергії.

Визначено, що за умови застосування конверсії палива та відповідно добавок синтез-газу, питома ефективна витрата етанолу, в залежності від режиму роботи двигуна, знижується до 12 %. Кількість енергії, яку необхідно використати в реакторі для отримання синтез-газу, складає 50...65 % від теплоти, що виділяється з відпрацьованими газами на даному режимі роботи.

Встановлено, що застосування роторно-поршневої розширювальної машини в якості першого ступеня утилізації тепла відпрацьованих газів дозволило отримати приріст потужності енергетичної установки на 27 %.

Встановлено, що застосування двох ступенів утилізації, призводить до зниження питомої ефективної витрати палива на 29 %

Ключові слова: конверсія, етанол, синтез-газ, відпрацьовані гази, паливо, роторно-поршнева розширювальна машина

1. Введение

На сегодняшний день около 80 % потребления топлива нефтяного происхождения расходуется на транспорте различного назначения. В связи с угрозой уменьшения запасов нефти, ужесточением требований по охране окружающей среды, а также стремлением к энергетической безопасности, интенсивно ведутся исследования по повышению топливной эффективности двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Ведутся активные поиски эффективных способов глубокой утилизации тепла вторичных энергоресурсов (ВЭР) энергетических установок (ЭУ) [1–3], а также использование альтернативных видов топлива [4–6].

Реализованные в данное время системы утилизации низкопотенциальной тепловой энергии имеют ряд существенных недостатков (высокая технологичность и стоимость оборудования, габаритные размеры), что сдерживает их использования в ЭУ с ДВС небольшой мощности. Это обуславливает необходимость использования новых подходов к решению этой проблемы. При оценке пригодности схемы утилизации необходимо учитывать:

- условия эксплуатации ЭУ;
- возможность резервирования средств утилизации;
- удобство и надежность эксплуатации, простота конструкции;
- экономичность работы установки при учете стоимости оборудования.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

При утилизации тепла ВЭР ДВС основной целью является получение дополнительной механической или электрической энергии.

Основные методы утилизации тепла современных ДВС:

- турбокомпаундные системы;
- паротурбинные установки, работающие по циклу Ренкина;
- установки с низкокипящим рабочим телом;
- охлаждение наддувочного воздуха утилизационными холодильными машинами.

Для утилизации тепла ВЭР известно применение фирмой MAN Diesel & Turbo (Germany) турбокомпаундных систем (Turbo-Compaund System) [7, 8]. В таких системах отходящие газы, параллельными каналами, направляются к силовой турбине и турбокомпрессору. Экономия топлива для среднеоборотных двигателей достигает 6 %, в зависимости от режима работы. Преимуществами турбокомпаундных утилизационных систем есть хорошие массогабаритные показатели, отсутствие дополнительных теплоносителей. Недостатком является узкий диапазон работы (например, 40...60 % MCR). Во время настройки утилизационной установки на широкий диапазон работы КПД установки не превышает 3 %, при настройке на узкий диапазон – достигает 5 %. Однако не рассматриваются возможные схемы применения данного способа утилизации для двигателей меньшей мощности, например двигатели наземной мобильной техники (автомобили, строительные, сельскохозяйственные машины).

Реализованные в настоящее время системы утилизации на основе циклов Ренкина с применением различных рабочих тел имеют низкий КПД и значительные массогабаритные показатели. В работе [9] предложено использование

паровой турбокомпрессии как альтернативы паровым утилизационным установкам. Здесь выхлопные газы расходуются исключительно на нагрев водяного пара, который используется для привода турбокомпрессора и силовой турбины. Однако остались вопросы технической реализации данного способа, а именно подбор необходимого оборудования системы утилизации и его характеристики.

Использование низкокипящих веществ в утилизационных установках повышает их эффективность. Так, ряд низкокипящих рабочих жидкостей, таких, как силиконовые масла, пропан, фторхлоруглероды (фреоны), изопентан, изобутан, n-пентан, толуол имеют низкую температуру кипения и более высокое давление в паровой фазе, чем вода. Такие циклы встречаются под аббревиатурой ORC (Organic Rankine Cycles). В работах [10, 11] приведены основные результаты термодинамического исследования эффективности ORC, который использует в качестве рабочего тела низкокипящие вещества по классификации ASHRAE для выработки электроэнергии. Однако вопросы высокой стоимости и токсичности этих жидкостей не рассмотрены, что существенно ограничивает применение таких схем.

В работах [12, 13] рассмотрены особенности охлаждения наддувочного воздуха теплоиспользующими эжекторными холодильными машинами, в которых функцию компрессора выполняет эжектор. Однако не рассматриваются вопросы массогабаритных показателей этих установок и возможность использования на стационарных двигателях.

Таким образом рассмотренные выше способы утилизации не нашли применения на двигателях малой мощности и в особенности на двигателях с искровым зажиганием.

Одним из перспективных способов утилизации, который успешно может быть использован для этих ДВС и отвечать всем специфическим требованиям, является утилизация тепла отходящих газов (ОГ) для осуществления конверсии исходного углеводородного топлива в газообразное (синтез-газ).

В работах [14, 15] представлены результаты экспериментальных исследования рабочих характеристик и выбросов загрязняющих веществ двигателя с непосредственным впрыском топлива с искровым зажиганием, разработанного для совместной работы с системой рекуперации высокого давления на основе паровой конверсии метанола. Двигатель с использованием продуктов паровой конверсии метанола показывает увеличение эффективности на 18...39 %, а также снижение выбросов NO_x , CO , CH и CO_2 . Однако не рассмотрены конструктивные особенности реализации данной схемы и взаимосвязь рабочего цикла двигателя и параметров рекуперации.

В направлении утилизации тепла ОГ остается большое количество нерешенных задач и проблем. Особенно в области применения различных способов утилизации либо их сочетания для поршневых двигателей с искровым зажиганием малой мощности. Поэтому предлагается к реализации схема глубокой двухступенчатой утилизации тепла вторичных энергоресурсов для ДВС с искровым зажиганием. Схема утилизации объединяет два перспективных способа – утилизация механической энергии в роторно-поршневой расширительной машине (первая ступень) и утилизация тепловой энергии в реакторе конверсии

топлива (вторая ступень). Этот подход даёт возможность значительно повысить эффективность и экономичность ЭУ малой мощности в целом.

3. Цель и задачи исследования

Целью исследования является разработка ЭУ на базе ДВС с искровым зажиганием и системой глубокой двухступенчатой утилизацией тепла ОГ. Это даст возможность определить параметры работы и эффективности применения роторно-поршневой расширительной машины, а также реактора конверсии топлива в качестве ступеней утилизации.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- скомпоновать схему ЭУ с глубокой двухступенчатой системой утилизации тепла ОГ ДВС, а также подобрать основные ее элементы первой и второй ступени;
- определить характеристики работы первой ступени утилизации в виде роторно-поршневой расширительной машины;
- определить характеристики работы второй ступени утилизации (реактора конверсии топлива), а именно зависимости степени конверсии этанола от температуры реакции и массового расхода топлива;
- проанализировать эффективность применения глубокой двухступенчатой утилизацией тепла отходящих газов.

4. Описание схемы и подбор элементов энергетической установки с глубокой утилизацией тепла отходящих газов

Принципиальная схема энергетической установки представлена на рис. 1. Основными ее элементами являются двигатель внутреннего сгорания с искровым зажиганием 1Ч 6,8/5,4 2, роторно-поршневая расширительная машина 4, реактор конверсии топлива 6.

В качестве первой ступени утилизации тепла было выбрано роторно-поршневую расширительную машину (рис. 2) [16]. В качестве второй ступени утилизации тепла был спроектирован и изготовлен реактор конверсии топлива (рис. 3). Реактор был установлен вместо глушителя на двигателе, при этом реактор стал выполнять функции утилизатора и глушителя шума.

Далее отходящие газы поступают в реактор конверсии топлива 6. Также в реактор 6 из расходного бака 1 поступает жидкое топливо, где под действием тепла ОГ происходит реакция конверсии исходного топлива в синтез-газ. Полученное в реакторе газообразное топливо состоит из 43 % H_2 , 34 % CO , 23 % CH_4 .

Таким образом, частично тепло от отходящих газов возвращается обратно в рабочий цикл, то есть происходит термохимическая утилизация тепла. Полученный синтез-газ имеет низшую теплоту сгорания 28,79 МДж/кг, а плотность составляет 0,63 кг/м³.

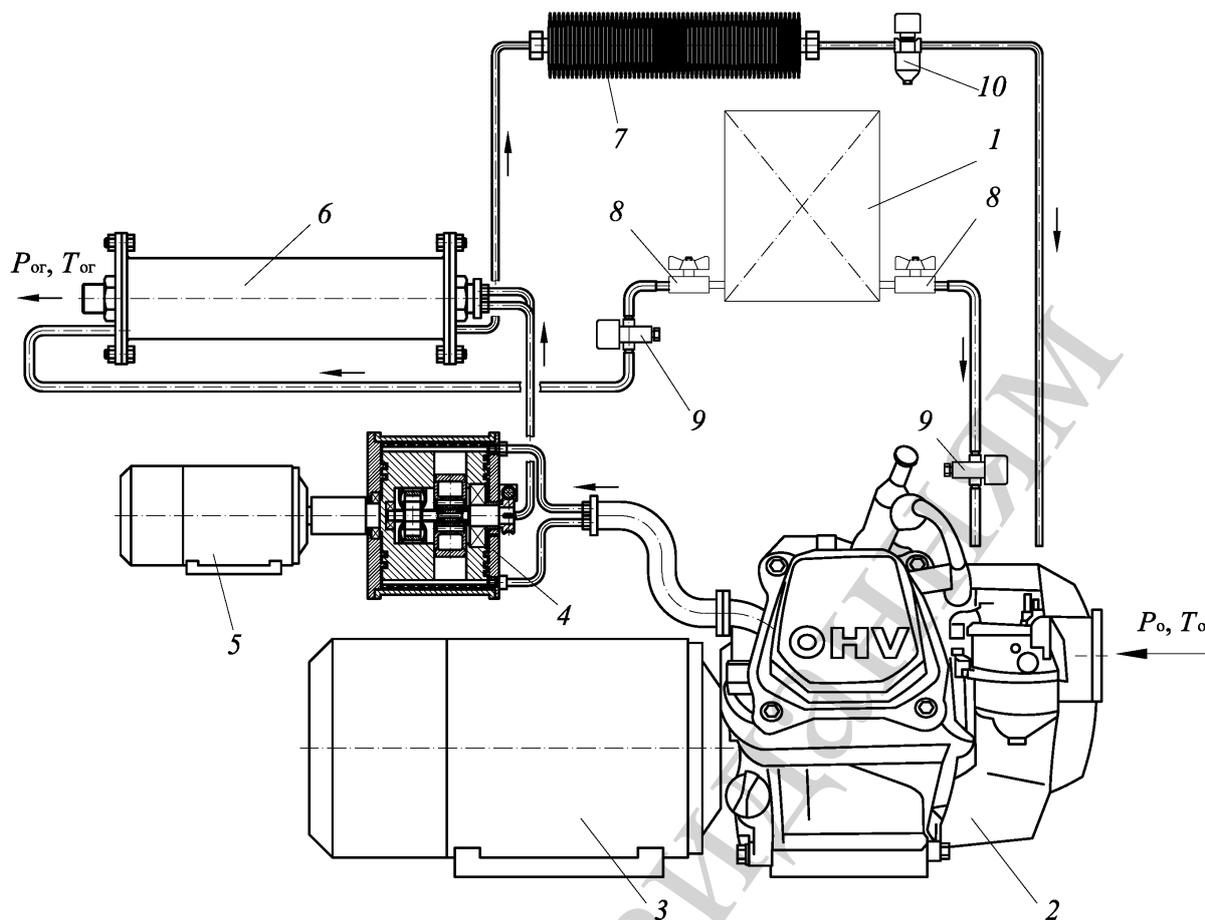


Рис. 1. Общая схема энергетической установки с глубокой утилизацией тепла отходящих газов: 1 – расходный бак с жидким топливом; 2 – двигатель внутреннего сгорания 1Ч 6,8/5,4; 3 – генератор электрического тока; 4 – роторно-поршневая расширительная машина; 5 – генератор электрического тока малой мощности; 6 – реактор конверсии топлива; 7 – охладитель синтез-газа; 8 – кран перекрытия жидкого топлива; 9 – электромагнитный топливный клапан; 10 – электромагнитный газовый клапан с фильтром

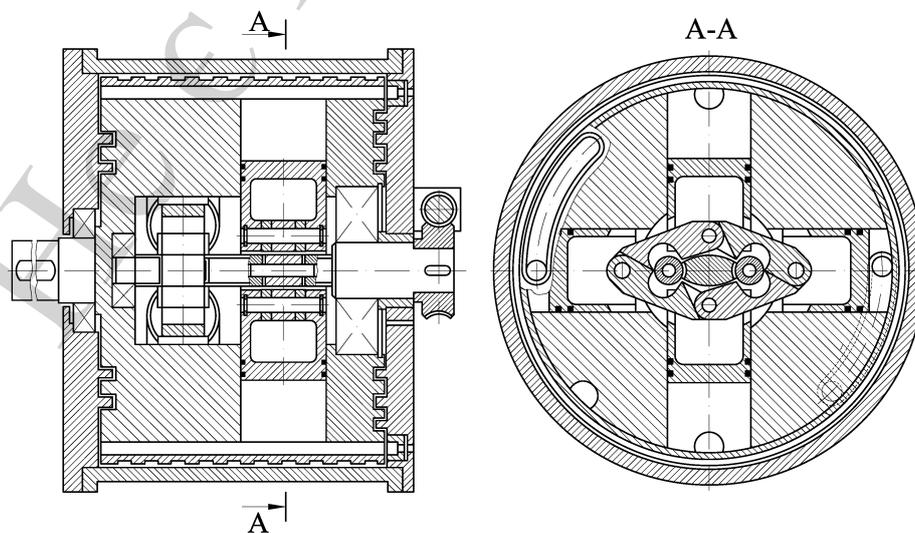


Рис. 2. Роторно-поршневая расширительная машина

Из расходного бака 1 жидкое топливо поступает в двигатель 2, нагружен штатным генератором 3. Отходящие газы из двигателя 2 поступают из общего коллектора во впускные камеры роторно-поршневой расширительной машины 4, которая в свою очередь приводит в движение генератор электрического тока 5. В роторно-поршневой расширительной машине используется механическая энергия отработавших в рабочем цилиндре газов, то есть осуществляется первая ступень утилизации.

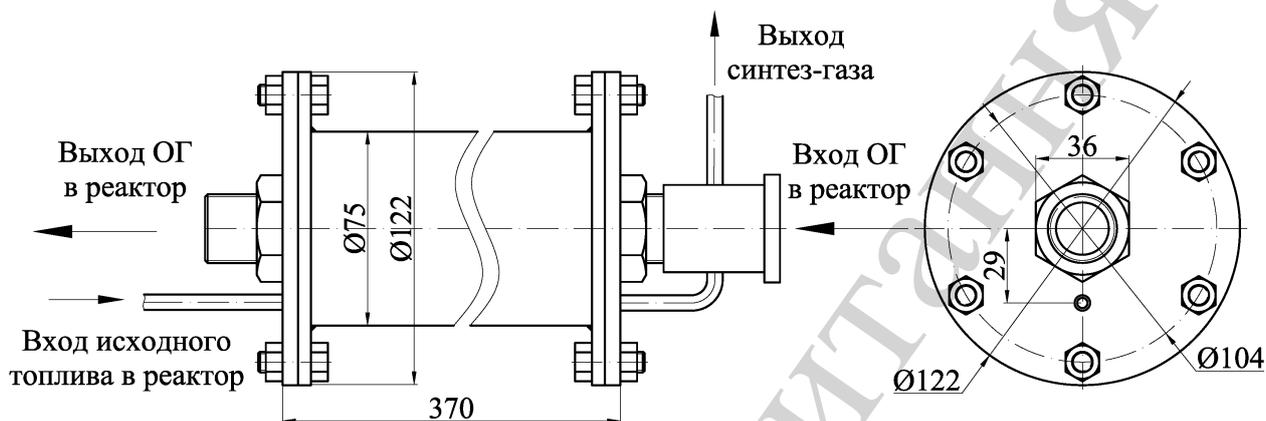


Рис. 3. Реактор конверсии топлива

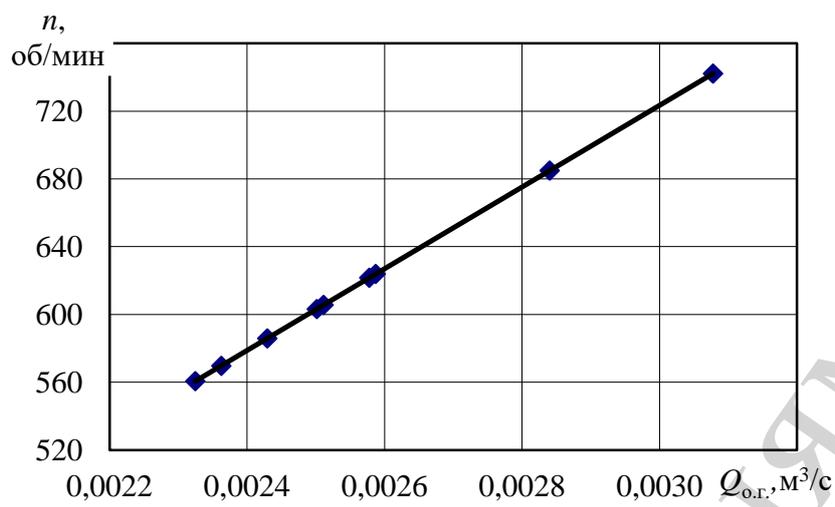
После реактора конверсии, синтез-газ поступает на охлаждение в теплообменный аппарат 7, а далее через электромагнитный газовый клапан с фильтром в двигатель 2. Основными параметрами процесса преобразования исходного вида топлива в синтез-газ являются:

- степень конверсии топлива ξ , то есть доля топлива, которая превратилась в синтез-газ по реакции;
- относительная расход топлива на конверсию Δg^n , то есть масса топлива, которое необходимо для получения 1 кг синтез-газа;
- удельная теплота химической реакции $q_{x.p.}$ – количество энергии, которая необходима для преодоления реакции конверсии 1 кг исходного топлива.

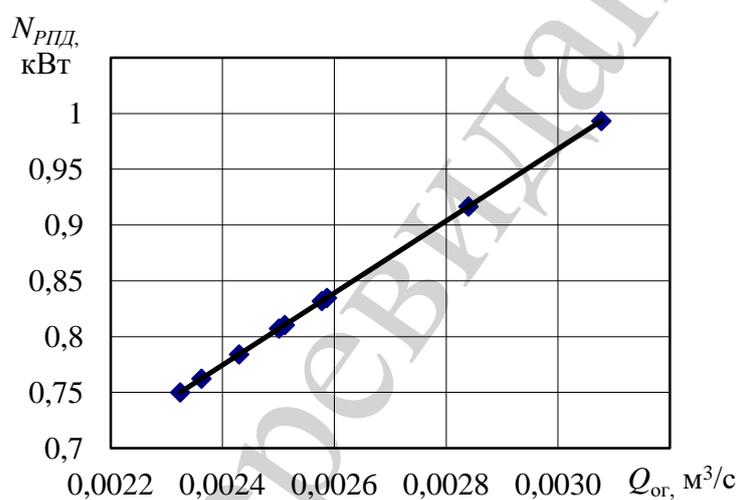
5. Результаты исследований работы ступеней глубокой утилизации

5.1. Характеристики работы первой ступени утилизации

Первой ступенью утилизации тепла отработавших газов является роторно-поршневая расширительная машина. Эффективность утилизации напрямую зависит от расхода и давления ОГ на выходе из ДВС. На рис. 4 представлены осредненные зависимости частоты вращения ротора и эффективной мощности роторно-поршневого двигателя от расхода ОГ. С ростом выходной мощности ДВС возрастает количество ОГ и соответственно растет мощность роторно-поршневого двигателя. Так при достижении ДВС мощности в 2,5 кВт, мощность роторно-поршневого двигателя составит 1 кВт при 756 об/мин.



a



б

Рис. 4. Зависимости параметров работы роторно-поршневого двигателя от расхода рабочего тела: *a* – частота вращения ротора; *б* – эффективная мощность

5. 2. Характеристики работы второй ступени утилизации

Второй ступенью утилизации тепла отработавших газов является реактор конверсии топлива. Данный способ позволяет получить газообразное топливо с более высокой теплотой сгорания, а также улучшить и сам процесс сгорания в рабочем цилиндре. На рис. 5 показаны экспериментально измеренные значения температуры (абсолютная погрешность измерения $\pm 10^\circ\text{C}$) ОГ, жидкого этанола и синтез-газа (продукты конверсии этанола) на входе и выходе из реактора в зависимости от нагрузки двигателя, а также аппроксимирующие кривые (достоверность аппроксимации R^2 находится в диапазоне 0,81...0,92).

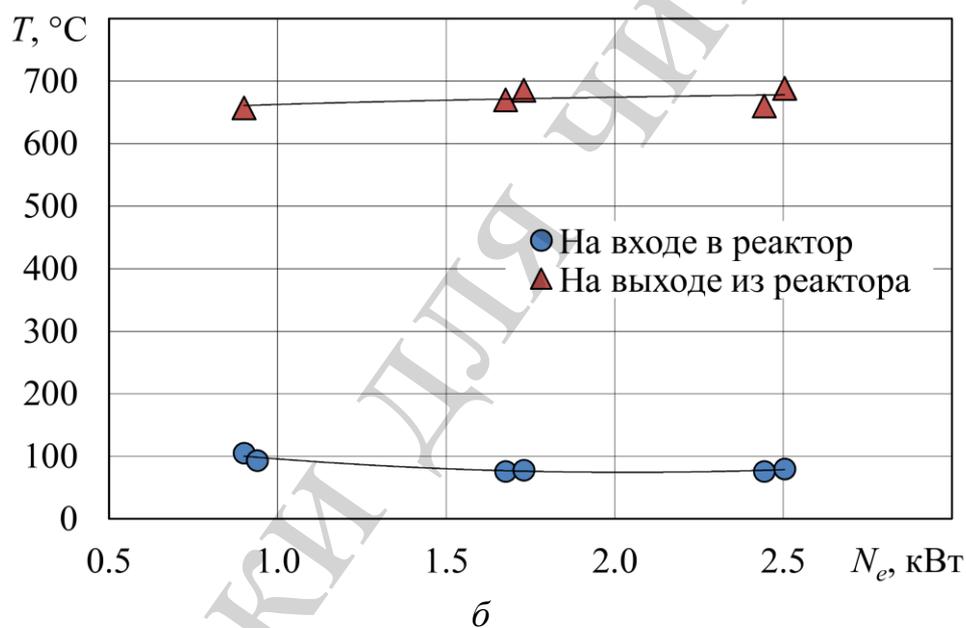
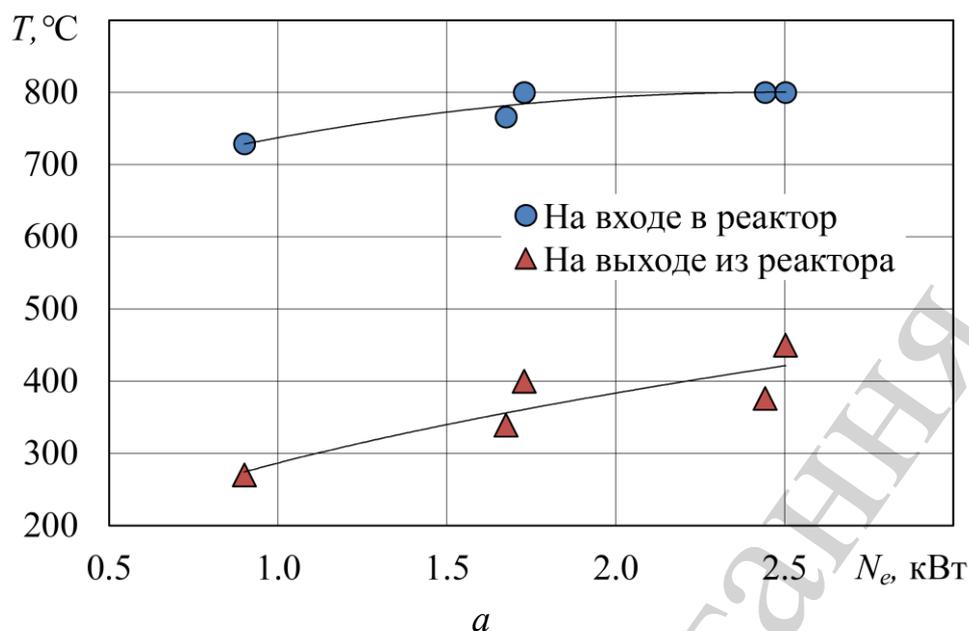


Рис. 5. Температура рабочих тел в реакторе: *a* – отработанные газы; *б* – этанол

Измерения массы этанола на входе и на выходе из реактора (абсолютная погрешность измерения ± 10 г) позволили получить зависимость степени конверсии от температуры реакции (температура синтез-газа на выходе из реактора) (рис. 6) с достоверностью аппроксимации $R^2=0,96$, а также зависимость степени конверсии от массового расхода этанола через реактор (рис. 7) с достоверностью аппроксимации $R^2=0,93$.

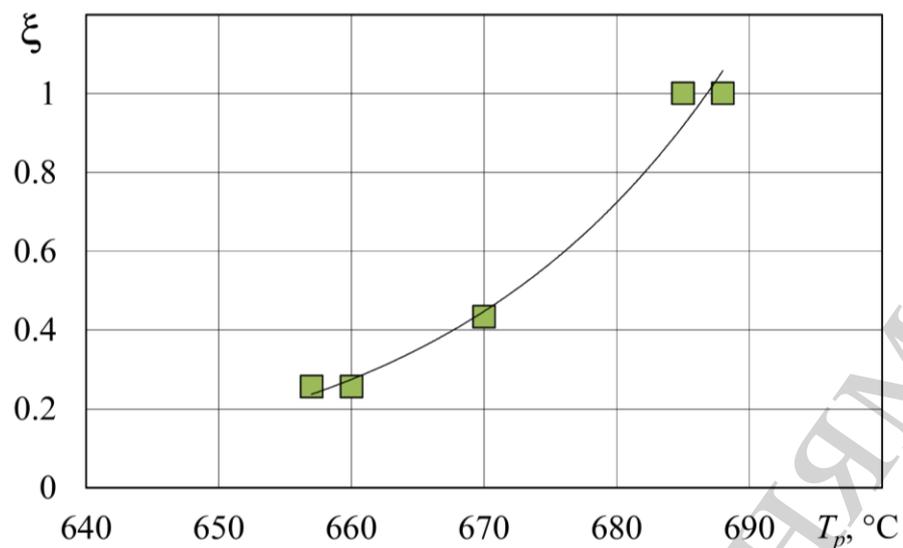


Рис. 6. Зависимость степени конверсии этанола от температуры реакции

Полная конверсия этанола была достигнута при температуре 685 °С и выше. При достижении полной конверсии для получения 1 кг синтез-газа расходуется 1 кг этанола, то есть весь жидкий этанол, который поступил в реактор, полностью превратился в газообразное топливо.

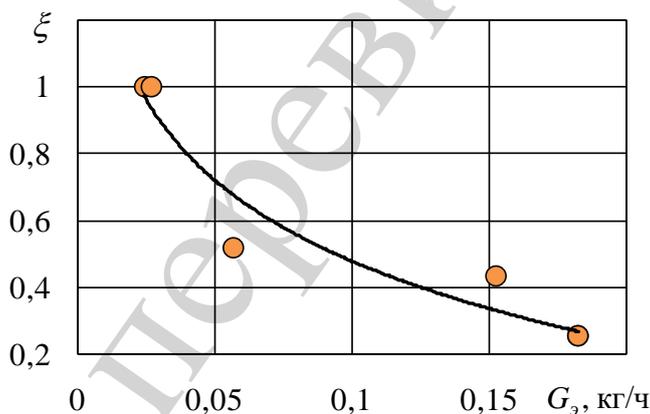


Рис. 7. Зависимость степени конверсии от массового расхода этанола через реактор

Для эффективной реализации утилизации теплоты ОГ на основе конверсии топлива в поршневых ДВС необходимо, чтобы температурно-энергетический потенциал отработанных газов был достаточным для получения из этанола синтез-газа, необходимого количества и состава. Количество энергии, необходимой для получения синтез-газа определяется как:

$$Q_{с.г}^{необ} = Q_{наг} + Q_{исп} + Q_{пер} + Q_{х.р} + Q_{тп},$$

где $Q_{наг}$ – количество энергии, которая расходуется на нагрев этанола до температуры кипения; $Q_{исп}$ – количество энергии, которая расходуется на испарение этанола; $Q_{пер}$ – количество энергии, которая расходуется на перегрев газообраз-

ного этанола до температуры конверсии; $Q_{х.р}$ – количество энергии, которая расходуется на преодоление эндотермической эффекта реакции химического превращения этанола в синтез-газ; $Q_{тп}$ – количество энергии, которая учитывает неизбежные тепловые потери в окружающую среду через реактор.

На рис. 8 показаны экспериментально измеренные значения тепловой мощности отработанных газов на выходе из двигателя и мощности, которая была использована в реакторе (абсолютная погрешность измерения ± 50 Вт) при различной нагрузке двигателя, а также аппроксимирующие кривые (достоверность аппроксимации R^2 находится в диапазоне 0,82...0,91).

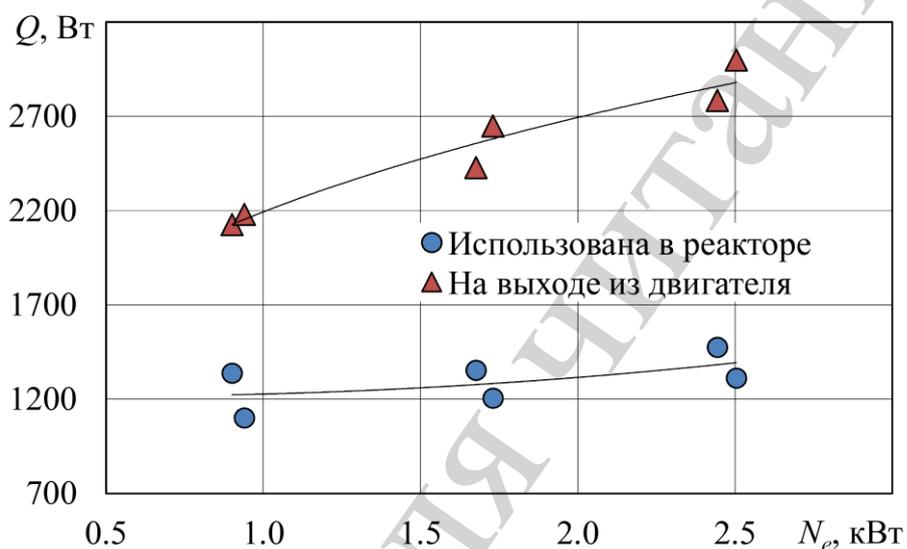


Рис. 8. Тепловая мощность отработанных газов

В табл. 1 представлены результаты экспериментальных измерений количества энергии, которая расходуется в реакторе конверсии для получения синтез-газа.

Таблица 1

Энергия, которая расходуется в реакторе конверсии для получения синтез-газа

| Параметр | Нагрузка двигателя, N_e | | | |
|---|---------------------------|---------|--------|---------|
| | 1,0 кВт | 1,5 кВт | 2 кВт | 2,5 кВт |
| Нагрев этанола до температуры кипения, Вт | 7,65 | 6,73 | 6,90 | 8,16 |
| Испарение этанола, Вт | 29,41 | 27,56 | 27,83 | 30,23 |
| Преодоление эндотермического эффекта реакции превращения этанола в синтез-газ, Вт | 47,15 | 41,49 | 42,55 | 50,31 |
| Перегрев газообразного этанола до температуры конверсии, Вт | 64,95 | 58,31 | 59,71 | 69,16 |
| Суммарная энергия, необходимая для получения синтез-газа, Вт | 149,15 | 134,09 | 137,00 | 157,86 |

Наибольшее количество энергии затрачивается на перегрев газообразного этанола (40...45 % от суммарного количества энергии), что связано с высоким значением температуры при некаталитической конверсии.

5.3. Анализ эффективности применения глубокой двухступенчатой утилизацией тепла отходящих газов

Для оценки эффективности применения только лишь утилизации тепла ОГ для конверсии топлива двигателя 1Ч 6,8/5,4, сравнивались удельный эффективный расход топлива при работе двигателя на этаноле и расход этанола при работе с добавками синтез-газа (рис. 9). При использовании добавок синтез-газа удельный эффективный расход этанола на 1Ч 6,8/5,4 снизился на 12 %.

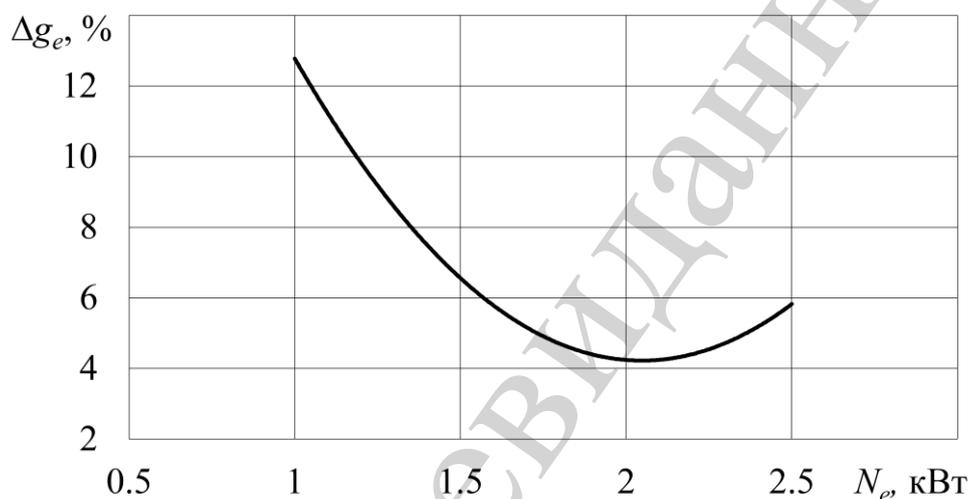


Рис. 9. Оценка эффективности применения конверсии топлива

Согласно результатам, представленным на рис. 10, при достижении полной конверсии для получения 1 кг синтез-газа расходуется 4,0 МДж тепловой энергии. Согласно данным, представленным в табл. 1 и рис. 8, для получения синтез-газа в энергетической установке на базе двигателя с искровым зажиганием 1Ч 6,8/5,4 необходимо использовать 50...65 % тепловой энергии отработавших газов. В результате утилизируется 4...6 % теплоты, которое повторно принимает участие в организации рабочего цикла двигателя.

При использовании двух ступеней утилизации эффективная мощность энергетической установки на максимальных режимах работы возросла с 2,5 до 3,43 кВт. При этом удельный эффективный расход топлива снизился с 460 до 327 г/(кВт·ч). На рис. 11 представлена зависимость изменения удельного эффективного расхода топлива от вырабатываемой мощности при условии глубокой утилизации тепла ОГ и без неё.

То есть при использовании глубокой утилизации тепла снижение расхода топлива достигается на уровне 29 %. При этом общая мощность энергетической установки выросла до 40 %.

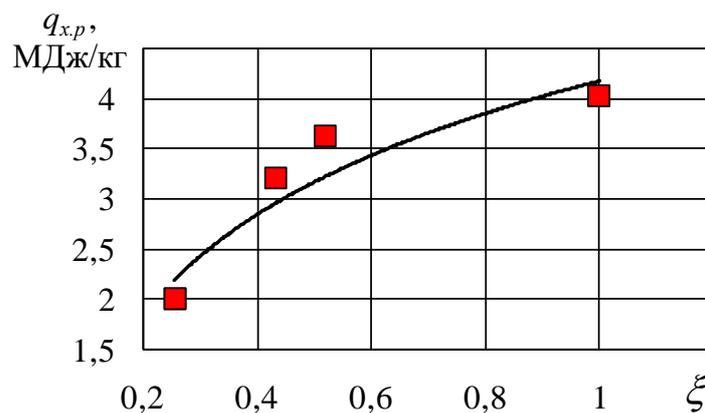


Рис. 10. Зависимость удельной теплоты химической реакции от степени конверсии

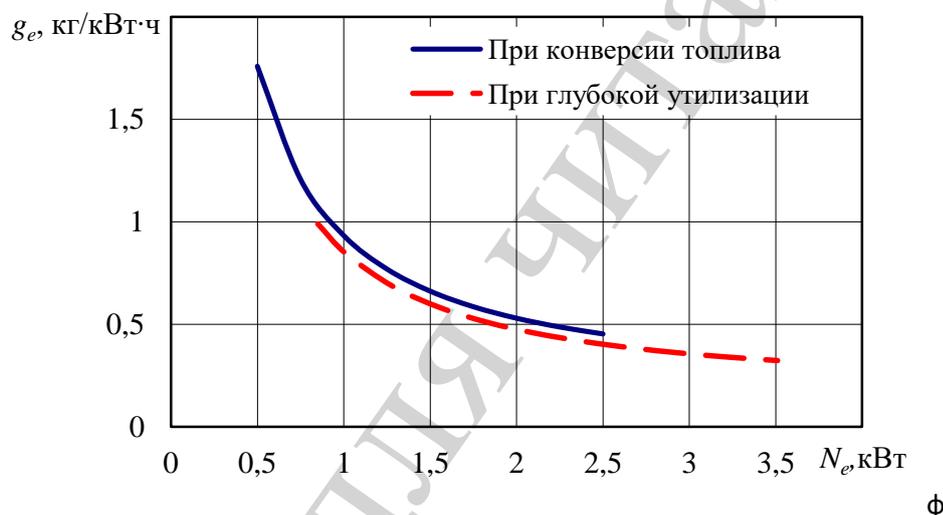


Рис. 11. Зависимость удельного эффективного расхода топлива от эффективной мощности энергетической установки

6. Обсуждение результатов исследования эффективности применения глубокой двухступенчатой утилизацией тепла отходящих газов

В табл. 2 приведены данные по эффективности (снижение расхода топлива) при применении различных способов утилизации, которые широко используются в ДВС. Однако стоит отметить, что все они реализованы в дизельных двигателях большой размерности и мощности. Из-за высокой технологичности, стоимости и габаритов их применение на двигателях малой мощности практически не реализуемо.

Поэтому, предложенная схема энергетической установки (рис. 1) с глубокой двухступенчатой системой утилизации тепла ОГ является перспективным способом повышения топливной экономичности поршневых двигателей с искровым зажиганием и объемом цилиндра 240...500 см³. В частности, данные типы двигателей широко применяются в наземных транспортных ЭУ, стационарных и мобильных электростанциях, а также в качестве привода различных агрегатов.

Таблица 2

Эффективность применения способов утилизации в ДВС [7]

| Способы утилизации | Снижение расхода топлива, % |
|--|-----------------------------|
| Механические турбокомпаундные установки | 1..3 |
| Электрические турбокомпаундные установки | 5...7 |
| Паротурбинные установки (Цикл Ренкина) | 4...5 |
| Гибридные турбокомпаундные установки | 9...11 |
| Установки с низкокипящим рабочим телом | 7...9 |
| Термоэлектрические генераторы | 0,5...2,2 |
| Металлогидридные установки непрерывного действия | 8...12 |

Первая ступень утилизации использует механическую энергию ОГ во всем диапазоне работы ЭУ (рис. 4) и позволяет дополнительно получить до 1 кВт полезной мощности.

Вторая ступень утилизации использует тепловую энергию ОГ для разложения исходного топлива (этанола) в горючий синтез-газ. В результате эндотермической реакции разложения часть тепла возвращается обратно в цикл. При этом в составе синтез-газа присутствует водород, который также позитивно влияет на процесс сгорания в двигателе. В результате этих двух факторов снижение удельного эффективного расхода топлива составляет до 12 % (рис. 10).

Существующие технологии, а также реакторы конверсии топлив [17–19], используют различные катализаторы, что позволяет снизить температуру реакции и получать газообразное топливо разного состава. Однако существенным недостатком является их высокая стоимость и быстрая загрязняемость, что способствует постоянному снижению их активной способности. Для данного типа ДВС с искровым зажиганием температура ОГ позволяет осуществить реакцию конверсии (рис. 5, 6) без применения катализаторов, что и предусмотрено в конструкции разработанного реактора (рис. 3).

Подобранные элементы каждой ступени позволяют постепенно утилизировать свою часть тепла и тем самым снизить расход топлива всей ЭУ до 29 %.

Исследования проводились на двигателе с принудительным зажиганием и без наддува (атмосферный двигатель). Так как двигатели с газотурбинным наддувом обладают более высокими показателями эффективности использования энергии сжигаемого топлива, исследования параметров работы такого типа двигателей являются перспективными и существенно могут расширить и дополнить уже полученные данные. Также достаточно перспективными являются исследования применения предложенной глубокой двухступенчатой утилизации тепла ОГ для дизельных двигателей малой мощности.

7. Выводы

1. Предложена схема энергетической установки с глубокой двухступенчатой системой утилизации тепла ОГ, а также спроектированы основные ее элементы (реактор конверсии топлива и роторно-поршневая расширительная ма-

шина). Особенностью данной схемы является возможность ее применения для двигателей малой мощности с искровым зажиганием.

2. В зависимости от режима работы ДВС расход рабочего тела через расширительную машину составляет 8,3...11,3 м³/ч, а частота вращения ротора – 560...760 об/мин. При этом применение роторно-поршневой расширительной машины в качестве первой ступени утилизации тепла ОГ позволило получить прирост мощности энергетической установки с 2,5 до 3,43 кВт.

3. Применение реактора конверсии топлива в качестве второй ступени позволяет вернуть обратно в цикл до 4...6 % теплоты от общего объема ОГ. При этом необходимое количество тепла для реализации конверсии исходного топлива составляет 50...65 %.

4. Установлено, что при достижении полной конверсии за реакцией разложения весь жидкий этанол, который поступил в реактор конверсии, полностью превращается в горючий синтез-газ. Основными компонентами синтез-газа являются водород (43 %), окись углерода (34 %) и метан (23 %). Расчетная удельная низшая теплота сгорания синтез-газа составляет 28,79 МДж/кг. При этом для получения 1 кг синтез-газа расходуется 4,0 МДж тепловой энергии.

5. При условии использования только реактора конверсии топлива удельный эффективный расход топлива, в зависимости от режима работы двигателя, снижается до 12 %. Применение расширительной машины в комплексе с реактором позволяет снизить удельный эффективный расход топлива до 29 %.

Литература

1. Gajendra Babu, M. K., Subramanian, K. A. (2013). *Alternative Transportation Fuels: Utilisation in Combustion Engines*. CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business, 464. doi: <https://doi.org/10.1201/b14995>
2. Srinivasnaik, M., Sudhakar, Dr. T. V. V., Balunaik, Dr. B. (2015). Biofuels as Alternative fuels for Internal Combustion Engines. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 5 (12), 531–536.
3. A Study of the Effects of Running Gasoline with 15% Ethanol Concentration in Current Production Outboard Four-Stroke Engines and Conventional Two-Stroke Outboard Marine Engines (2011). National Renewable Energy Laboratory. URL: <http://www.nrel.gov/docs/fy12osti/52909.pdf>
4. Saadatfar, B., Fakhrai, R., Fransson, T. (2013). Waste heat recovery Organic Rankine cycles in sustainable energy conversion: A state-of-the-art review. *The Journal of MacroTrends in Energy and Sustainability*, 1 (1), 161–188.
5. Tahani, M., Javan, S., Biglari, M. (2013). A comprehensive study on waste heat recovery from internal combustion engines using organic Rankine cycle. *Thermal Science*, 17 (2), 611–624. doi: <https://doi.org/10.2298/tsci111219051t>
6. Larsen, U., Nguyen, T.-V., Knudsen, T., Haglind, F. (2014). System analysis and optimisation of a Kalina split-cycle for waste heat recovery on large marine diesel engines. *Energy*, 64, 484–494. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.10.069>
7. Waste Heat Recovery System (WHRS) for Reduction of Fuel Consumption, Emissions and EEDI (2012). *MAN Diesel & Turbo*. Copenhagen, 32. URL:

[https://turbomachinery.mandieselturbo.com/docs/librariesprovider4/Turbomachinery_doc/waste-heat-recovery-system-\(whrs\).pdf](https://turbomachinery.mandieselturbo.com/docs/librariesprovider4/Turbomachinery_doc/waste-heat-recovery-system-(whrs).pdf)

8. Noor, A. M., Puteh, R. C., Rajoo, S. (2014). Waste Heat Recovery Technologies In Turbocharged Automotive Engine – A Review. *Journal of Modern Science and Technology*, 2 (1), 108–119.

9. Fu, J., Liu, J., Yang, Y., Ren, C., Zhu, G. (2013). A new approach for exhaust energy recovery of internal combustion engine: Steam turbocharging. *Applied Thermal Engineering*, 52 (1), 150–159. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.11.035>

10. Vélez, F., Segovia, J. J., Martín, M. C., Antolín, G., Chejne, F., Quijano, A. (2012). A technical, economical and market review of organic Rankine cycles for the conversion of low-grade heat for power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (6), 4175–4189. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.022>

11. Wang, E., Zhang, H., Fan, B., Wu, Y. (2012). Optimized performances comparison of organic Rankine cycles for low grade waste heat recovery. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26 (8), 2301–2312. doi: <https://doi.org/10.1007/s12206-012-0603-4>

12. Радченко, Н. И., Сирота, А. А., Радченко, Р. Н., Коновалов, Д. В. (2013). Потенциал охлаждения наддувочного воздуха малооборотного дизеля транспортного судна. *Авиационно-космическая техника и технология*, 8 (105), 67–72.

13. Радченко, Р. Н., Радченко, Н. И., Бес, Т., Сирота, А. А. (2012). Охлаждение воздуха на входе главного двигателя транспортного судна. *Авиационно-космическая техника и технология*, 10 (97), 61–67.

14. Poran, A., Tartakovsky, L. (2017). Performance and emissions of a direct injection internal combustion engine devised for joint operation with a high-pressure thermochemical recuperation system. *Energy*, 124, 214–226. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.074>

15. Tartakovsky, L. (2018). High-pressure thermo-chemical recuperation – a way toward sustainable propulsion systems. *Procedia Manufacturing*, 21, 37–44. doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.092>

16. Фролов, В. К., Тетерев, В. С., Волощук, О. И., Шабалин, Ю. В. (1995). Пат. № 7592 UA. Поршнева машина. № 4345140/SU; опубл. 29.09.1995.

17. Бородин, В. И., Трухачева, В. А. (2007). Термодинамический анализ высокотемпературной переработки естественного полимера – древесины. *Современные наукоемкие технологии*, 1, 47–48. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=9899973>

18. Каменев, В. Ф., Корнилов, Г. С., Хрипач, Н. Л. (2004). Гибридное автотранспортное средство с энергетической установкой, работающей на водородном топливе. *Альтернативная энергетика и экология*, 2 (10), 28–36. URL: <http://naukarus.com/gibridnoe-avtotransportnoe-sredstvo-s-energeticheskoy-ustanovkoy-rabotayuschey-na-vodorodnom-toplive>

19. Крылов, О. В. (2000). Углекислотная конверсия метана в синтез-газ. *Российский Химический Журнал*, XLIV (1), 19–33. URL: <http://www.chem.msu.ru/rus/jvho/2000-1/19.pdf>