

ЭНЕРГОУСТАНОВКИ МОБИЛЬНЫХ СЕЛЬХОЗМАШИН С ПРИМЕНЕНИЕМ ВИХРЕВЫХ ЭЖЕКТОРОВ ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ

POWER PLANTS OF MOBILE AGRICULTURAL MACHINERY USING VORTEX EXHAUST EJECTORS

З.А. ГОДЖАЕВ, д.т.н.
Р.А. СЕРЕБРЯКОВ, к.т.н.
А.И. КУСКОВ, к.т.н.

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ,
Москва, Россия, fic51@mail.ru

Z.A. GODZHAEV, DSc in Engineering
R.A. SEREBRYAKOV, PhD in Engineering
A.I. KUSKOV, PhD in Engineering

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia,
fic51@mail.ru

Охрана окружающей среды является одной из наиболее актуальных проблем современного мира, поскольку от ее решения зависят жизнь на Земле, здоровье и благосостояние человечества. Ежегодно мировое хозяйство выбрасывает в атмосферу 350 млн тонн окиси углерода, более 50 млн тонн различных углеводородов, 150 млн. тонн двуокиси серы. В атмосфере накапливается углекислый газ, и в тоже время уменьшается количество кислорода, причем «вклад» выбросов автотранспортных средств в атмосферу составляет до 90 % по окиси углерода и 70 % по окиси азота.

Вихревой эжектор выхлопных газов позволяет улучшить параметры двигателей внутреннего сгорания и дизелей энергоустановок мобильных сельхозмашин: повышается их мощность, снижается расход топлива, а также токсичность и шум. Вихревой эжектор, за счет аэродинамики и особенностей течения закрученного потока, способен создавать в приосевой области потока более высокую зону пониженного давления, чем прямоструйный, работать в широком диапазоне давлений входного потока газа, обладает всережимностью. Предложены конструктивные варианты вихревого эжектора выхлопных газов для различных типов энергоустановок мобильных сельскохозяйственных машин. Проведенные экспериментальные стендовые и натурные исследования различных автотранспортных средств подтвердили увеличение эффективной мощности ДВС и дизелей на 12 %, снижение часового расхода топлива до 20 %, уменьшение токсичности выхлопных газов на 10–15 %.

Ключевые слова: выхлопные газы, токсичность, шум, аэродинамика, эжектор, вихревой эффект, коэффициент эжекции, мобильные сельхозмашины.

Environmental protection is one of the most important problems of the modern world, since life on Earth, the health and well-being of mankind depend on its solution. Every year the world economy emits into the atmosphere 350 million tons of carbon monoxide, more than 50 million tons of various hydrocarbons, 150 million tons of sulfur dioxide. Carbon dioxide is accumulated in the atmosphere and at the same time, the amount of oxygen decreases, and the «contribution» of motor vehicle emissions to the atmosphere is up to 90 % for carbon monoxide and 70 % for nitric oxide. A vortex exhaust ejector allows to improve the parameters of internal combustion engines (ICE) and diesel engines of mobile agricultural machines: their power increase and fuel consumption, as well as toxicity and noise reduce. Due to the aerodynamics and flow characteristics of the swirl flow, a vortex ejector is capable of creating a higher zone of reduced pressure in the near-axial area of the flow than a straight-jet one, and it is capable to operate in a wide range of pressures of the gas inlet flow, and has all the modes. Constructive options of a vortex exhaust ejector for various types of power plants of mobile agricultural machinery are proposed. The experimental bench and field studies of various vehicles confirmed an increase in the effective power of ICE and diesel engines by 12 %, a decrease in hourly fuel consumption of up to 20%, and a decrease in toxicity of exhaust gases by 10–15 %

Keywords: exhaust gases, toxicity, noise, aerodynamics, ejector, vortex effect, ejection coefficient, mobile agricultural machinery.

Введение

За полтора столетия усовершенствований поршневой двигатель внутреннего сгорания (ДВС) с кривошипно-шатунным механизмом стал повсеместно распространен, а его конструкция доведена до высокого совершенства. Его позитивные и негативные качества общеизвестны, но на сегодня ничего лучшего нет. Ясно, что путем улучшения конструкции и повышения культуры производства радикально улучшить основные показатели поршневого ДВС не удастся.

Какой бы ни был сегодня хороший поршневой двигатель, но клапаны в нем все равно остаются, как бы они не выглядели, и именно газораспределение создает основные проблемы, внося максимальные усложнения в конструкцию двигателя, и, в еще большей степени, составляет основные расходы при ремонте и эксплуатации силового агрегата.

Другим недостатком является то, что использование энергии отработавших газов поршневых двигателей ограничивается лишь умеренным турбонаддувом этих двигателей.

Все производимые серийно гибридные автомобили используют силовые установки, состоящие из двигателя внутреннего сгорания, системы рекуперации энергии торможения, аккумулятора и электродвигателя.

Пневмодвигатели обладают высокой надежностью, компактностью и экологичностью [5]. Они имеют эффективное соотношение между весом и мощностью. Мощность и частота вращения регулируется простым изменением давления воздуха. Пневмодвигатели могут работать на самых необычных режимах – от максимальных оборотов до внезапной остановки. Они могут стать перспективной заменой малым и средним легковым электрическим гибридам. Пневматические гибриды, в отличие от электрических с аккумуляторной батареей, хранят запасенную энергию в ресивере-накопителе в виде энергии сжатого воздуха, который можно закачать на заправочной станции.

Двигатели и турбины, работающие на горячих сжатых выхлопных газах, по принципу работы можно отнести к пневматическим двигателям. Они имеют нагрузочную характеристику, схожую с пневмодвигателем и паровой машиной. Экспериментально доказано, что автомобиль с паровым двигателем мощностью в три раза меньшей, чем такой же автомобиль с ДВС, имеет аналогичную приемистость [1, 2].

Эти качественные показатели газотурбинной установки все больше привлекают создателей энергоустановок мобильных сельхозмашин.

Таким образом, с целью более эффективно использования энергии топлива, сгораемого в поршневом двигателе при более высоком давлении, т.е. для повышения КПД, необходимо позволить продуктам сгорания топлива расширяться не только в двигателе, но и во внешней расширительной машине с получением полезной работы. А процесс компрессии, или сжатия, воздуха перед подачей его в поршневую камеру сгорания можно оставить в объемной поршневой машине, т.е. сохранить за ней выполнение работы, затрачиваемой на сжатие воздуха поршнями, как в поршневом компрессоре, аналогично турбокомпрессору газотурбинного двигателя (ГТД).

Цель исследований

Анализ возможности повышения эффективности энергоустановок мобильных сельхозмашин за счет применения вихревых эжекторов выхлопных газов.

Материалы и методы

Повышение КПД и увеличение массового расхода рабочего тела для более эффективной работы силовой расширительной машины (СРМ) достигается путем использования газоструйного, или вихревого, эжектора, позволяющего за счет разрежения создавать увеличенную массу газозооушной смеси из горячих выхлопных газов и холодного атмосферного воздуха.

Эжектор (рис. 1) функционирует следующим образом. Рабочая среда массой M_1 от компрессора поступает в сопло, в котором за счет сужения разгоняется. Эжектируемая среда массой M_2 подводится к патрубку подвода эжектирующей среды.

Далее, за счет действия сил трения, эжектируемая среда вовлекается в камеру смешения попутно потоку рабочей среды. По мере завершения процесса массообмена, теплообмена и обмена количеством движения между фазами в камере смешения происходит выравнивание температур и скоростей движения фаз. Статическое давление в потоке достигает минимального значения. В процессе истечения сформированной в камере смешения смеси через выходной диффузор кинетическая энергия потока смеси массой M_3 превращается

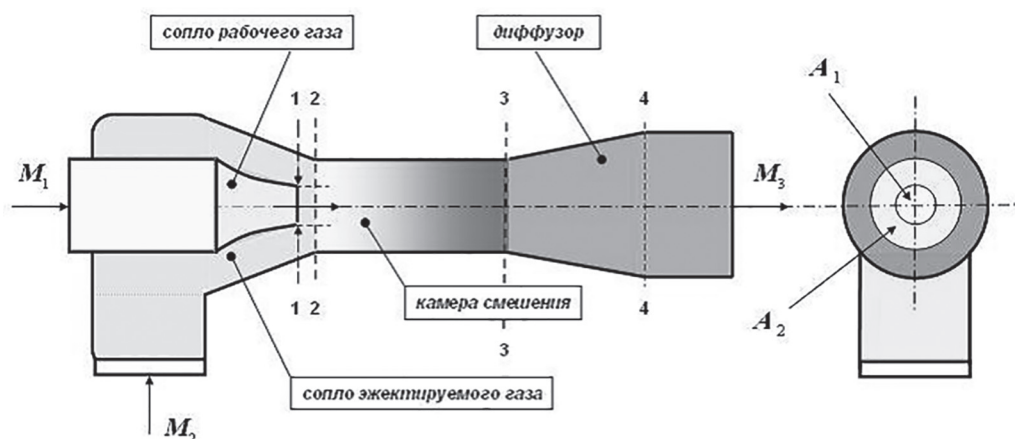


Рис. 1. Эжектор

в потенциальную энергию давления. Скорость движения потока снижается, статическое давление в смеси возрастает. При этом давление смеси на выходе устройства превышает давление эжектируемого потока на входе. Газоструйный эжектор постепенно вытесняется вихревым газоструйным эжектором [1, 2], в основе работы которого лежит способность «вихревой трубы» к самовакуумированию. Выхлопные газы от системы выхлопа двигателя поступают в продольные прямоочные каналы и создают зону пониженного давления, одновременно выхлопные газы увлекают за собой атмосферный воздух. Использование вихревого эжектора, помимо увеличения скорости потока смеси выхлопных газов и воздуха, улучшает поглощение шума выхлопа за счет подавления резонансных всплесков звуковых частот. Тем самым, за счет создаваемого в эжекторе разрежения и присоединения дополнительной массы воздуха к рабочему телу турбины, потенциальная энергия сжатого силой гравитации атмосферного воздуха становится дополнительным даровым источником энергии в комбинированном двигателе (КД).

Основой внедрения эжекционного процесса в энергетике стало научное открытие О.И. Кудрина, А.В. Квасникова, В.Н. Челомея «Явление аномально высокого прироста тяги в газовом эжекционном процессе с пульсирующей активной струей» [3]. С тех пор во всех конструкциях двигателей в ракетной технике В.Н. Челомей использовал струйные технологии. Было однозначно доказано, что данный эффект полезен не только для создания дополнительной реактивной тяги, но и для использования его в эжекторном сопловом аппарате ГТД с целью получения дополнительной мощности на валу.

Более экономичный, чем ДВС и дизель, турбопоршневой двигатель (ТПД) с эжектором и силовой турбиной может служить для привода высокооборотного генератора, а при наличии редуктора – приводом насоса водометного движителя или судового винта. Учитывая большой крутящий момент на малых оборотах вращения силовой турбины, ТПД может служить также приводом наземного транспортного средства (тепловоза, танка, трактора, грузовика) без использования многоступенчатой коробки передач.

Необходимо отметить следующие преимущества ТПД с эжектором и силовой турбиной перед электрическими гибридами [6]:

- силовая турбина в несколько раз легче соответствующего электромотора;
- силовые турбины без проблем выдерживают высокую температуру;
- обслуживание турбин проводить значительно проще, чем электродвигателей.

Силовые приводы, работающие на сжатых горячих выхлопных газах, должны иметь 4-тактный двигатель внутреннего сгорания (ДВС) в качестве газогенератора и силовую расширительную машину (СРМ) объемного или лопаточного типа (рис. 2), имеющую кинематическую связь с колесами транспортного средства [4].

Алгоритм работы транспортного силового привода с эжектором и утилизацией энергии выхлопных газов двигателя-газогенератора следующий:

- 1) запускается двигатель-газогенератор, и при его малых оборотах СРМ не вращается;
- 2) увеличивают обороты холостого хода газогенератора, и выхлопные газы, проходя через сопло эжектора, создают разрежение и смешиваются с атмосферным воздухом. Далее

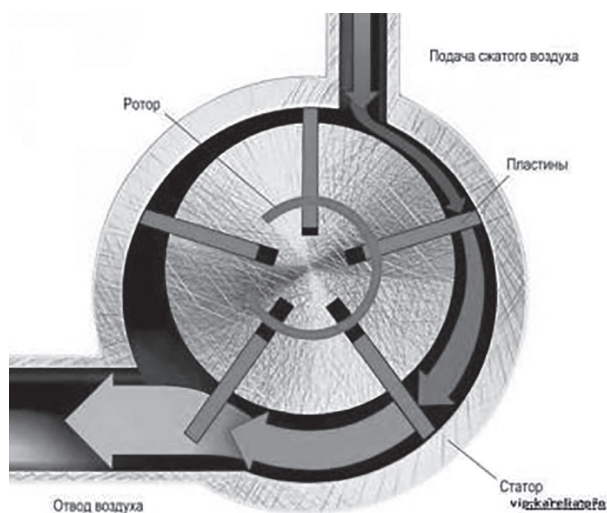


Рис. 2. Роторная СРМ

при увеличении подачи смеси через турбину мощность и частота вращения СРМ повышаются до максимума;

3) разгон транспортного средства (ТС) происходит при подключении двигателя-газогенератора к силовому валу и осуществлении экономичного движения с двойной тягой: за счет двигателя и турбины, использующей энергию смеси выхлопных газов и окружающей среды;

4) интенсивный расход выхлопных газов происходит только в периоды ускорения, чтобы кратковременно обеспечить работу СРМ с повышенной мощностью.

Применение ТПД с эжектором и силовой турбиной позволяет снизить требуемую агрегатную мощность двигателя-газогенератора в 1,5–2 раза.

Результаты и обсуждение

Для повышения экономичности и удельной мощности двигателей с принудительным воспламенением в настоящее время широко используется газотурбинный наддув, а также, в определенных условиях, наддув от приводного компрессора. Для двигателей с турбонадувом, для повышения удельной мощности, требуется обеспечение наиболее полной очистки цилиндров и снижение потерь располагаемой работы выпускных газов.

Применение наддува (т.е. повышение давления воздуха, подающегося в цилиндр, до 0,02–0,2 МПа) не только увеличивают удельную мощность двигателя внутреннего сгорания, но и уменьшают его удельную массу на 20–25 %. Для наддува ДВС применяют лопаточные, радиальные и роторные нагнетатели.

Привод их осуществляется или от коленчатого вала двигателя (рис. 3), или от специальной газовой турбины, использующей энергию отработавших в двигателе газов (рис. 4).

Одним из условий достижения максимального КПД действия газовой турбины является условие постоянства параметров потока выпускных газов перед турбиной. Однако цикличности процессов в цилиндрах двигателя и, как следствие, периодическому нестационарному истечению из цилиндров газов сопутствуют распространяющиеся по выпускному трубопроводу волны давления. В результате наложения волн давления, образующихся при впуске из различных цилиндров, и их взаимодействия с отраженными волнами условие постоянства параметров потока перед турбиной не выполняется, что, естественно, несколько снижает эффект турбонаддува.

Эффективность применения системы турбонаддува можно повысить, если между выпускными трубопроводами и турбиной установить «вихревой эжекторный насадок», который будет выполнять роль так называемого преобразователя импульсов. Насадок своими входами объединяет выпуски всех цилиндров ДВС, поэтому фазы выпусков не совпадают, и газ из нижнего цилиндра втекает в смеситель насадка с меньшей скоростью. При втекании в смеситель нижняя граница высоконапорной струи турбулизуется. В результате обмена количествами движения турбулентных масс скорость низконапорной струи увеличивается и происходит смешение газов, вытекающих из диффузора. Следовательно, в преобразователе импульсов возникает эжектирующий эффект. Закономерности изменения параметров вытекающей эжектирующей струи на начальном участке смесителя аналогичны закономерностям свободной турбулентной струи. Пограничный слой на некотором расстоянии от сопла распространяется не на все сечения смесителя. Однако значения параметров газа по расходу этого сечения различны. Поэтому более полное смешение газов и «выравнивание» параметров газа достигается в конечном сечении смесителя эжектора.

Т.е., в случае размещения вихревого эжекторного насадка на выхлопном патрубке двигателя с турбонадувом (рис. 3), он несколько сгладит пульсации давления выхлопной системы и тем самым понизит противодавление за турбиной. Это позволит увеличить распола-

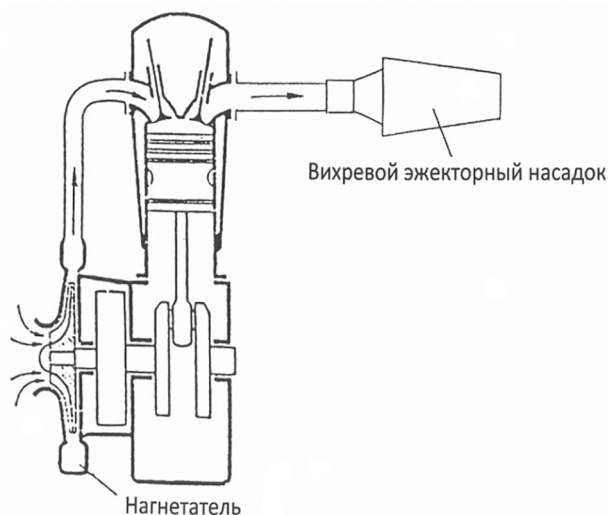


Рис. 3. Двигатель с турбонаддувом без дополнительной газовой турбины

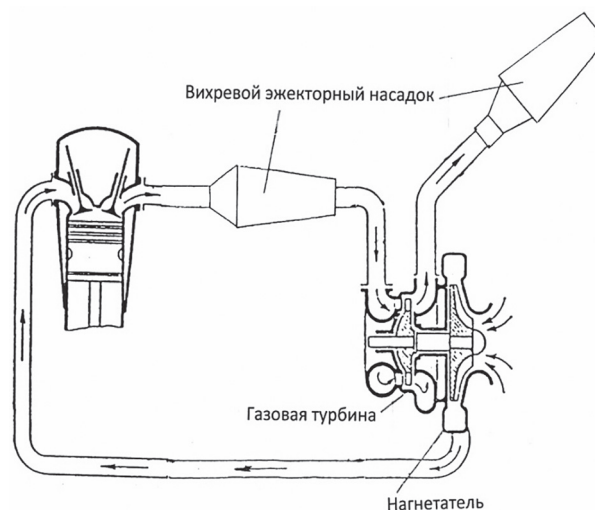


Рис. 4. Двигатель с турбонаддувом с дополнительной газовой турбиной

гаемый перепад давлений на турбине, увеличить давление на входе в цилиндр и несколько увеличить литровую мощность двигателя (~5%). Установка же вихревого насадка между выпускными трубопроводами и турбиной в качестве преобразователя импульсов также улучшит работу турбонаддува (рис. 4). Внутренний и внешний каналы вихревого насадка объединяют выпуск выхлопных газов из групп цилиндров, фазы выпуска отработавших газов из которых не совпадают. Это позволит, в результате обмена количеством движения, увеличить скорость низконапорной струи, улучшив продувку цилиндров.

Кроме того, одновременная установка второго вихревого насадка на выхлопной патрубке уже после турбонаддува, с эжекцией выхлопных газов набегающим потоком воздуха, также несколько увеличит мощность ДВС (до ~5%).

Все вышеизложенные теоретические оценки применения вихревого эжекторного насадка в ДВС с турбонаддувом требуют дополнительных экспериментальных исследований.

Выводы

В ранних разработках ДВС энергия потока отработавших газов в обычных двигателях вообще не использовалась, а только рассеивалась на глушителях в окружающую среду. Ее стали частично использовать только в турбовоздуходувках для осуществления наддува двигателя.

В предлагаемом турбопоршневом двигателе с эжектором процессы подачи, сжатия и сгорания топливоздушную смесь происходят

в поршневом двигателе, а расширение продуктов горения с совершением полезной работы – в силовой турбине. ТПД можно рассматривать как агрегат, заменяющий собой турбокомпрессор (т.е. компрессор с приводной турбиной) и камеру сгорания в обычном газотурбинном двигателе, но работающий по сравнению с ними более эффективно. Получение рабочего газа в ТПД происходит при высоких давлениях и температуре, не доступных для обычных газотурбинных двигателей, поэтому общий КПД комбинированного двигателя выше при умеренной температуре рабочего тела на входе в турбину.

В итоге КПД и экологические показатели модернизированного комбинированного двигателя выше, чем отдельно взятого поршневого двигателя и газотурбинного двигателя, а с учетом более полного использования энергии отходящих газов (ОГ) он может быть выше КПД современных дизелей [7].

За счет более полного сгорания топлива и расширения выхлопных газов в турбине до давления окружающей среды экономится до 20% энергии топлива, увеличивается крутящий момент, уменьшается уровень шума выхлопа и снижается токсичность выхлопных газов.

Литература

1. Серебряков Р.А. Вихревой эжекторный насадок, патент на изобретение № 2059859 Российская Федерация; опублик. 16.04.1993, Бюл. № 16.
2. Калениченко А.Б., Серебряков Р.А. Топливосберегающий экологически чистый вихревой эжекторный насадок // Строительные материа-

лы и оборудование, технологии XXI века. 2001. № 7. С. 18–21.

3. Кудрин О.И., Квасников А.В., Челомей В.Н.: открытие № 314 «Явление аномально высокого прироста тяги в газовом эжекционном процессе с пульсирующей активной струей». 1951.
4. Роторный двигатель: патент США № 7753036 от 13.07.2010.
5. Годжаев З.А., Аврамов Д.В., Мартынов Н.В., Белоусов Б.Н. Экологическая безопасность транспортно-технологических средств. Сельскохозяйственные машины и технологии. 2019. № 13 (2). С. 40–47.
6. Годжаев З.А., Гусаров В.А. Разработка газотурбинных установок малой мощности для использования на промышленных предприятиях // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2018. № 6. С. 27–33.
7. Годжаев З.А., Измайлов А.Ю., Лачуга Ю.Ф., Шогенов Ю.Х., Перспективы применения автоматизированных и роботизированных электроприводов на мобильных энергосредствах и рабочих органах сельхозмашин // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2018. № 2 (36). С. 41–47.

References

1. Serebryakov R.A. Vihrevoj ezhektornyj nasadok [Vortex ejector nozzle], patent na izobret-

enie No 2059859 Rossijskaya Federaciya; opubl. 16.04.1993, Byul. No 16.

2. Kalenichenko A.B., Serebryakov R.A. Fuel-saving environmentally friendly vortex ejector nozzles. Stroitel'nye materialy i oborudovanie, tekhnologii XXI veka. 2001. No 7, pp. 18–21 (in Russ.).
3. Kudrin O.I., Kvasnikov A.V., Shelomej V.N., Otkrytie No 314. YAvlenie anomal'no vysokogo prirosta tyagi v gazovom ezhekcionnom processe s pul'siruyushchej aktivnoj struej [Phenomenon of abnormally high thrust growth in a gas ejection process with a pulsating active jet]. 1951.
4. Rotornyj dvigatel'. Patent SSHA No 7753036 ot 13.07.2010.
5. Godzhaev Z.A., Avramov D.V., Martynov N.V., Belousov B.N. Environmental safety of vehicles. Sel'skohozyajstvennyye mashiny i tekhnologii. 2019. No 13 (2), pp. 40–47 (in Russ.).
6. Godzhaev Z.A., Gusarov V.A. Development of low power gas turbine units for use in industrial enterprises. Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin. 2018. No 6, pp. 27–33 (in Russ.).
7. Godzhaev Z.A., Izmajlov A.YU., Lachuga YU.F., SHogenov YU.H. Prospects for the use of automated and robotic electric drives on mobile power tools and working bodies of agricultural machines. Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta MAMI. 2018. No 2 (36), pp. 41–47 (in Russ.).