

Комбинированные энергетические установки
для железнодорожного транспорта.

В транспортной системе железные дороги занимают одно из ведущих мест, а транспортные издержки в значительной степени определяются затратами на топливо и смазочные материалы. Обеспечение высокой конкурентоспособности и инвестиционной привлекательности железнодорожного транспорта требует постоянного совершенствования тягового подвижного состава и, прежде всего, силовой установки (СУ).

Основной причиной, сдерживающей техническое совершенствование локомотивного парка, является традиционный подход к выбору типа силовой установки. В настоящее время на магистральных и маневровых локомотивах применяются двигатели, созданные 40 – 50 лет назад. К сожалению, серийные двигатели за истекшие годы не преодолели рубеж расхода топлива 192 г/кВтч, полученный 40 лет назад [1] на опытном тепловозном дизеле 3Д70Б. Некоторое снижение эксплуатационного расхода топлива достигнуто совершенствованием агрегатов и повышением экономичности частичных режимов. Показатели существующих двигателей находятся в области оптимума, поэтому улучшение одних показателей приводит к ухудшению других. Аналогичная картина характерна и для импортных дизелей (косвенное подтверждение – поставка Коломенских дизелей в Германию), поэтому замена отечественных дизелей на лицензионные является заведомым тупиком, приводящим к увеличению транспортных издержек, стоимости национального продукта и технической отсталости, т.к. лицензии продаются только на двигатели, находящиеся в производстве, т.е. морально устаревшие. Таким образом, совершенствование дизелей требует существенного увеличения

давления наддува, среднего эффективного давления и максимального давления цикла выше 20 – 25 МПа.

При оценке перспективных направлений совершенствования СУ необходим учет условий эксплуатации, действующих и перспективных ограничений. Очевидно, что нормы экологической безопасности будут ужесточаться и далее.

Эмиссия вредных веществ (ВВ) зависит от типа и технического состояния СУ, режима ее работы, расхода и состава топлива. Тип силовой установки определяет параметры расчетного режима, камеру сгорания, температуры, давления и время пребывания компонентов в зонах образования и рекомбинации ВВ, степень отличия нерасчетных режимов (частичных нагрузок, холостого хода и переходных режимов) от расчетного. Техническое состояние (степень исправности и износа) СУ в ряде случаев увеличивают эмиссию в несколько раз. Расход топлива также зависит от типа СУ, режима ее работы, параметров расчетного режима, степени отличия нерасчетных режимов от оптимального, технического состояния, сопротивления в газоздушном тракте (в том числе за счет нейтрализаторов).

Таким образом, для удовлетворения перспективным требованиям экологической безопасности необходимо, прежде всего, снижать эксплуатационный расход ископаемых топлив. Повышение эксплуатационного КПД способствует пропорциональному снижению выбросов ВВ и CO_2 . Для решения проблем экологии настоятельно требуются качественно новые силовые установки (СУ) и альтернативные топлива. Работа двигателя на природном газе (ПГ) с воспламенением от сжатия при переменной степени сжатия позволяет автоматически удовлетворять нормам «Евро-5» без систем нейтрализации выпускных газов. Однако при нормальных условиях в двигателе обеспечение процесса сгорания ПГ с воспламенением от сжатия требует высокой степени сжатия, при которой давление конца сжатия составляет не менее 18 МПа. В этом случае, даже при коэффициенте избытка воздуха = 2 максимальное давление цикла не может быть ниже 21 – 22 МПа, а на

номинальном режиме может достигать 28 – 36 МПа. Традиционные ДВС не могут работать с таким максимальным давлением цикла.

Газомоторные топлива, особенно в условиях кризиса, позволяют существенно поднять эффективность транспортно энергетического комплекса. Однако опыт создания газогенераторных и газовых (на сжатом природном газе) локомотивов показывает, что для перевозки необходимого запаса топлива требуется бустер или тендер. Удельные объемы даже сжиженного природного газа (СПГ) не позволяют разместить на транспортном средстве достаточный запас топлива. Удовлетворительное решение возникших проблем возможно, если удельные массу и объем СУ уменьшить в 2 – 5 раз по сравнению с тепловозными дизелями и снизить эксплуатационный расход топлива минимум в 1,5 - 2 раза. При выполнении этих условий появляется реальная возможность размещения на локомотиве СПГ в объеме, достаточном для сохранения запаса хода между экипировками аналогичном тепловозам на дизельном топливе.

В настоящее время для традиционных дизелей такие задачи не имеют практического решения, поэтому предприняты попытки применить авиационные и специальные газотурбинные двигатели (ГТД) на железнодорожном транспорте. Примером успешного решения задачи размещения достаточного запаса СПГ может служить газотурбовоз ГТ1. Однако при мощности 8,3 МВт ГТД расходует 2200 кг/час СПГ (эффективный КПД $\eta_e = 25,3 \%$), а на холостом ходе 535 кг/час, что ставит под сомнение рациональность применения авиационного ГТД и требует его замены на более эффективную СУ. Кроме того, на газотурбовозе имеется вспомогательный дизель – генератор мощностью 400 кВт, работающий на дизельном топливе.

Рассмотрим основные преимущества ГТД и возможный эффект от всех мероприятий по повышению КПД ГТД, при этом в массе и объеме СУ учтем значительный дополнительный запас топлива.

За счет применения новейших жаростойких и жаропрочных материалов действительно можно значительно увеличить максимальную температуру цикла (T_k) и КПД ГТД. Для ГТД характерна изобарная камера сгорания, т.е.

детали камеры сгорания и первой ступени турбины находятся постоянно под воздействием максимальной температуры цикла. В дизеле импульсная камера сгорания, поэтому при выполнении деталей камеры сгорания из материалов равной жаропрочности максимальная температура цикла в дизеле может быть на 500 – 1000 градусов выше, чем в ГТД. На любой цикл ГТД можно наложить более экономичный, заменой изобарной камеры сгорания импульсной.

По выбросам окислов азота ГТД (при $T_k = 1200^\circ\text{C}$) имеют существенные преимущества перед дизелями, но с ростом T_k это преимущество быстро превращается в свою противоположность. Образование окислов азота имеет термическую природу и их количество зависит от уровня T_k и времени действия данной T_k . Поэтому импульсная камера сгорания при одинаковых выбросах окислов азота на один килограмм проходящего через камеру сгорания воздуха будет иметь T_k на 250 – 300 градусов выше, чем изобарная и соответственно выше КПД. Для удовлетворения нормам выбросов окислов азота аналогичным нормам Евро-5 T_k в ГТД не может быть больше 1520 – 1550 °С. Причем превышение данной температуры даже на 50 градусов приведет к выбросам в 3 – 5 раз превышающие дизельные. Поэтому реальные зависимости КПД перспективных ГТД будут в абсолютных величинах на 5 - 10 % ниже предполагаемых.

Преимущества по массогабаритным показателям (без учета дополнительного запаса топлива) перед тепловозными дизелями имеют лишь авиационные ГТД с весьма низким КПД. Применение даже одного регенеративного теплообменника (для повышения КПД) увеличивает массу и габаритные размеры авиационного ГТД до уровня тепловозного дизеля. На газотурбовозе ГТ1 столь плотная компоновка, что отсутствует запас пространства для установки регенератора. Опыт создания маневрового газотурбовоза ГЭМ1000 также это подтверждает.

Отсутствие жидкостной системы охлаждения в ГТД можно считать положительным качеством. Однако снижение затрат на обслуживание не произойдет, т.к. необходимо обслуживать воздухоочистители, возросшие в

несколько раз, и регенераторы, очистка которых существенно сложнее радиаторных секций тепловоза и требуется чаще. В противном случае КПД ГТД упадет ниже 36 – 38 %.

Трудоемкость обслуживания и ремонта ГТД в местах эксплуатации действительно существенно ниже, т.к. их обслуживание возможно только на заводе-производителе или специальном ремонтном предприятии с существенно более высокой квалификацией персонала, нежели в депо. Увеличение T_k приведет к резкому снижению ресурса. Опыт газоперекачивающих станций ОАО «Газпром» показывает, что замена авиационных ГТД происходит каждые 8 – 12 месяцев (гарантийный назначенный ресурс лопаток авиационного ГТД составляет 5000 часов). Столь частая замена ГТД, их отправка на специализированное предприятие с дорогостоящим ремонтом не снизит, а наоборот увеличит издержки в эксплуатации. Кроме того, на каждый газотурбовоз потребуется иметь более одного ГТД стоимостью в пять раз выше дизеля, что также скажется на рентабельности ГТД.

Таким образом, для случая локомотива заявления некоторых специалистов о КПД ГТД 55 и более % за счет применения трех регенераторов с учетом вышеперечисленного выглядят «мягко говоря» необоснованными.

Опыт создания газотурбовозов ГТ1 и ГЭМ10 убедительно доказывает нерациональность применения авиационных ГТД на локомотиве. Повторился известный по танкам результат, когда авиационные двигатели вместе с системами и запасом топлива в наземных условиях не имеют преимуществ перед дизелями по массогабаритным показателям. Более того, из опыта сравнительной эксплуатации танков известно, что ГТД имеют на 30% больший эксплуатационный расход топлива и в пять - семь раз дороже дизелей. СУ газотурбовоза ГТ1 потребляет в 2 раза больше топлива, чем дизель тепловоза. Поэтому даже при более низкой цене природного газа эффективность инвестиций оказывается не высокой. К стоимости газотурбовоза необходимо добавить затраты на создание инфраструктуры получения и заправки СПГ, что при нынешнем КПД ГТ1 составит 1,5 – 2,5 млн. долларов США на

газотурбовоз. И только в случае существенного повышения КПД можно рассчитывать на экономическую эффективность газотурбовоза.

В настоящее время требованиям по КПД и удельным массогабаритным показателям для локомотива на СПГ удовлетворяют лишь комбинированные свободнопоршневые двигатели (КСПД), работающие в генераторном режиме [2]. СУ включает (рис. 1) СПД с двухступенчатым поршневым компрессором наддува, расширительную машину (РМ) и турбокомпрессор (ТК). В качестве РМ может применяться объемная расширительная машина (ОРМ) или турбина. По потоку рабочего тела турбину ТК рационально располагать за РМ, а компрессор перед компрессорами СПД. В этом случае ТК будет автоматически включаться в работу после полной загрузки поршневых компрессоров СПД и предшествующих турбинных ступеней РМ. В случае ОРМ такое расположение ТК является единственно возможным с точки зрения уменьшения объема и массы ОРМ, позволяет применить серийные ТК и обеспечивает формирование тяговой характеристики (запас по моменту 2,63 при фиксированной отсечке).

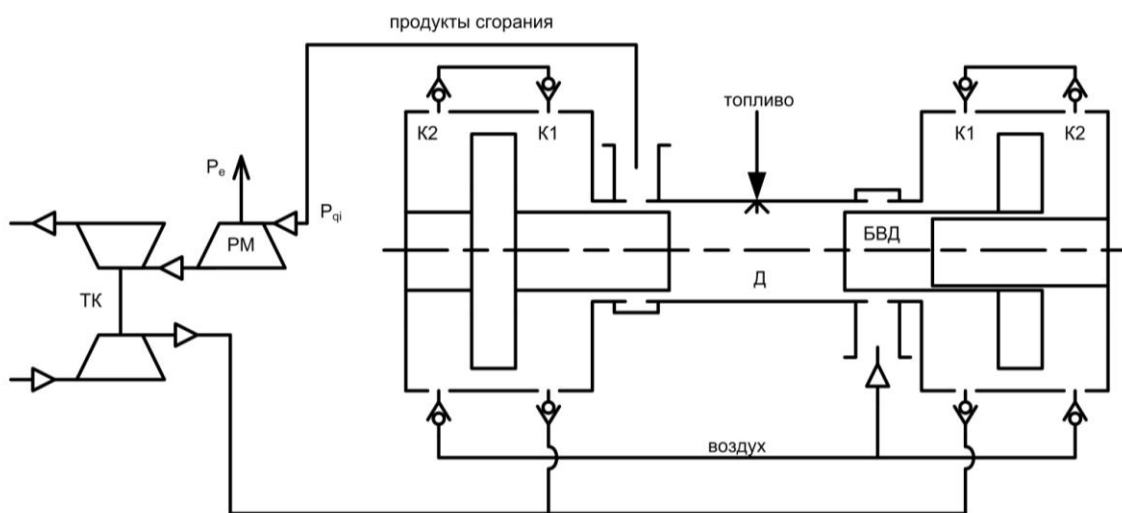


Рис.1. Схема комбинированного свободнопоршневого двигателя.

Д – дизель, БВД – буфер, К1, К2 – первая и вторая ступени поршневого компрессора, P_e – эффективная мощность, p_{q1} – давление в газосборнике.

За счет сверхвысокого наддува удельная масса СУ снижается в 4 – 9 раз по сравнению с дизелями. Известен газотурбовоз ГТ-101 [3] мощностью 3000 л.с. в секции. При выполнении СУ по схеме на рис.1 мощность этого газотурбовоза возрастет до 20,2 МВт в тех же габаритных размерах СУ. Так как от газотурбовоза не требуется более 10 МВт, то очевидно, что освобожденного пространства достаточно для размещения всех систем и запаса СПГ, которого требуется в 2 раза меньше, чем для ГТ1. На рис.2 приведены нагрузочные характеристики СУ различных локомотивов, показывающие, что даже в перспективе ГТД не будут иметь преимуществ по эксплуатационному КПД

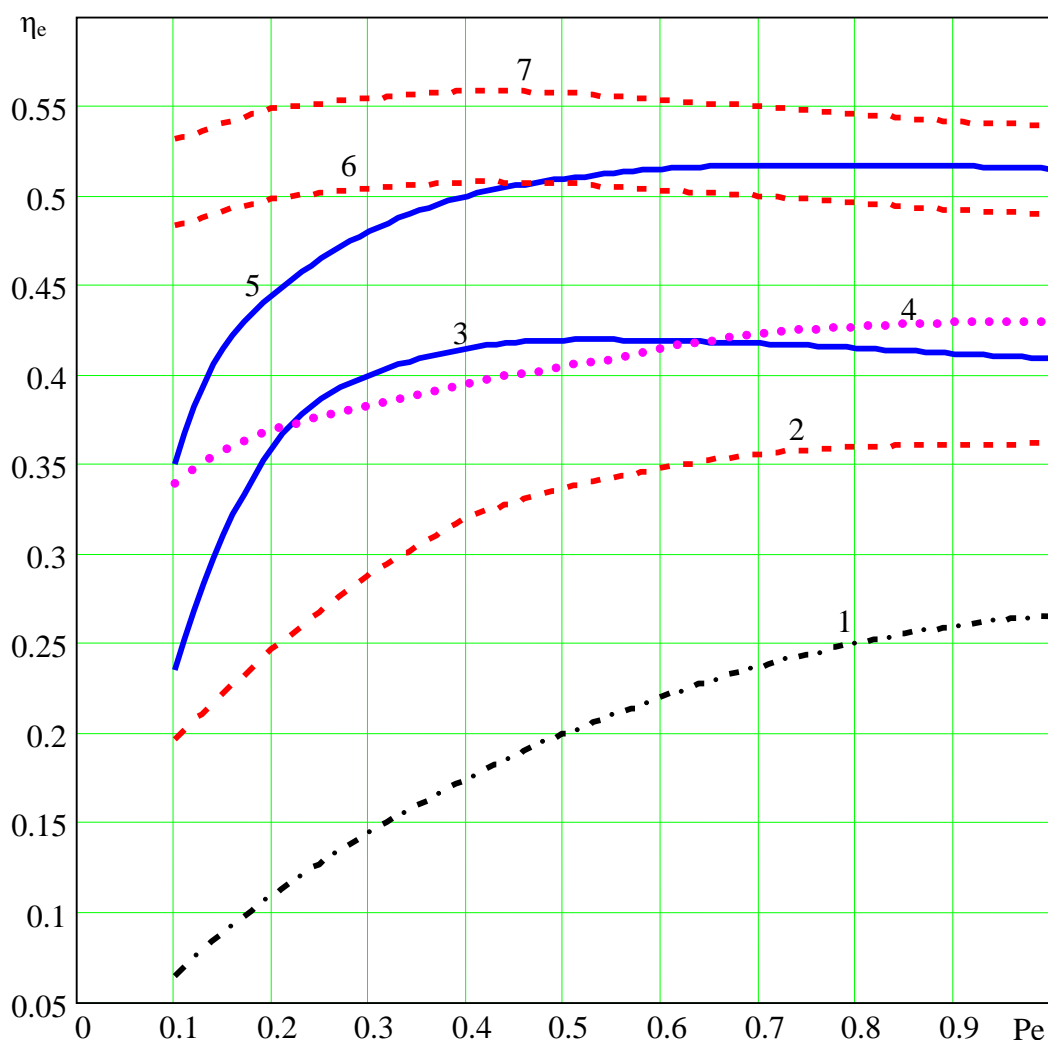


Рис. 2. Нагрузочные характеристики силовых установок локомотивов:

1 – ГТ1, 2 – ГТ-101, 3 – ГЭМ10, 4 - дизель Д49, 5 - ГТ3 (в перспективе с тремя регенераторами), 6 – КСПД, 7 – КСПД с двумя потоками рабочего тела и регенерацией.

перед КСПД. У последнего может быть один регенератор при расходе рабочего тела в 4 – 6 раз меньше, чем у ГТД равной мощности.

Эффективность локомотива определяется не только ценой применяемого топлива, но и эксплуатационным КПД, который может существенно отличаться от максимального в зависимости от типа СУ. Поэтому весь мир занят созданием комбинированных (гибридных) энергетических установок (КЭУ).

Основная цель использования КЭУ вместо обычной силовой установки транспортного средства (ТС) определяется следующим:

- возможностью применить ДВС меньшей мощности (на 25-50%);
- повышением коэффициента использования мощности ДВС с реализацией наиболее экономичных режимов его работы;
- снижением количества выбрасываемых в атмосферу токсических веществ на 50-85%;
- возможностью аккумуляирования рекуперированной тормозной энергии ТС, а также энергии, освобождаемой при движении на спусках.

В настоящее время КЭУ представляет наиболее перспективное направление в развитии транспортных средств, что подтверждается масштабами работ в области КЭУ. Однако в рамках традиционных поршневых двигателей не удастся существенно снизить массу и габаритные размеры КЭУ, т.к. это требует увеличения давления наддува в несколько раз, а у кривошипно-шатунного механизма (КШМ) практически отсутствуют резервы.

Режимы эксплуатации дизель – поездов, магистральных и маневровых локомотивов существенно различаются. Общим для них является разгон, торможение и холостой ход. Поэтому состав КЭУ и тип передачи может изменяться в зависимости от назначения.

Наиболее показательны в этом отношении маневровые локомотивы, имеющие особую специфику эксплуатации, которая характеризуется:

- долей холостого хода до 60 - 80 % всего времени работы;
- при работе под нагрузкой - непрерывными переходными процессами, как

по дизелю, так и по силовой передаче. Высокое совершенство ДВС на номинальном режиме (КПД $\eta_e = 40\%$) сводится на нет особенностями эксплуатации, которая приводит к низкому коэффициенту использования мощности 0,09-0,13 и среднеэксплуатационному КПД $\eta_s = 0,051-0,097$.

Появление современных КЭУ в значительной степени обязано различным вариантам аккумуляторных систем промышленного железнодорожного транспорта. Экономичность двигателя определяется не только термическим КПД реализуемого в нем цикла. Еще важна эффективность преобразования произведенной механической энергии в работу на колесе. Организация работы СУ по отдельному циклу позволяет существенно увеличить эксплуатационный КПД. Сгорание топлива происходит на расчетных режимах с постоянной мощностью, а необходимую тяговую характеристику обеспечивает расширительная машина. Сглаживание колебаний мощности на колесе обеспечивается накопителями энергии или рабочего тела (у паровоза это котел).

Известно, что паровая тяга имеет большие преимущества перед тепловозной тягой на маневровой работе, особенно в условиях промышленных предприятий. Даже промышленные паровозы старого поколения (постройки) по эффективности равнозначны современным маневровым тепловозам (для паровоза характерно $\eta_s = 0,06-0,08$) и превосходят тепловозы по надежности, простоте производства, обслуживания и ремонта, поэтому производственные и эксплуатационные издержки существенно ниже.

Особенно высокую эффективность на маневровой работе имеют транспортные средства с аккумуляторными энергиями. Они наиболее приспособлены к тяжелым условиям маневров, экологически чисты, экономичны, всегда готовы к работе и т.д.

Во многих странах создавались, эксплуатировались и эксплуатируются до настоящего времени так называемые бестопочные паровозы (локомотивы с пароводяными тепловыми аккумуляторными). Это "чужепарки", выпускавшиеся Германией в 30-х годах, локомотивы высокого давления Я. Гилли,

изготавливавшиеся с 1934 по 1963 г.г. Венским локомотивостроительным заводом во Флоридсдорфе (Австрия), бестопочные паровозы фирмы "Кеншель и сын" в Касселе (1953 г., ФРГ), локомотивы фирмы "Портер", заводов "Балдвин" (США), паровозы фирмы SGP, выпускавшиеся с 1961 по 1973 г.г. (Австрия), бестопочный паровоз БП1 (Муромский тепловозостроительный завод, СССР), локомотив "С" (1983 г., ГДР). Практика эксплуатации этих локомотивов показала их высокую эффективность, экологичность, надежность.

В силу низкой автономности локомотива (не более 8 – 10 часов) это направление не получило широкого распространения. В настоящее время применение таких систем экономически оправдано лишь на крупных металлургических предприятиях для утилизации вторичных энергоресурсов.

Современные КЭУ включают первичный двигатель-генератор (электрический, пневматический или гидравлический), накопители энергии и обратимый двигатель-генератор. Первичный двигатель-генератор преобразует химическую энергию топлива в энергию носителя, в качестве которого может быть электрический ток, сжатый газ (воздух), жидкость или механическая энергия, передаваемая от поршня к колесу.

Гибридные СУ с накопителями кинетической энергии не пригодны для транспорта. При достаточной энергоемкости в супермаховиках возникают значительные гироскопические моменты, нарушающие управляемость и безопасность движения в кривых участках пути. Установка систем безопасного подвешивания делает супермаховики не конкурентоспособными.

В случае электрической передачи применяют электрические накопители энергии. По сравнению с традиционной такая КЭУ имеет более высокий КПД и хорошую управляемость. Теоретически эта схема позволяет рекуперировать энергию торможения. Однако на практике существуют ограничения в электрических накопителях энергии. Электрохимические аккумуляторы ограничены по скорости зарядки и разрядки, а молекулярные конденсаторы имеют значительные потери на саморазряд. Обычные конденсаторы имеют недостаточную емкость.

Гидрообъемная передача решает те же задачи, что и предыдущая, но основным рабочим телом является жидкость. Обратимый гидравлический двигатель в насосном режиме пригоден для рекуперации энергии торможения. Эта энергия накапливается в гидропневматических аккумуляторах. С точки зрения эффективного аккумулирования энергии гидравлическая часть системы является избыточной. Использование для зарядки аккумуляторов азота и разделителя сред с учетом дополнительных потерь в гидромоторе и гидронасосе ограничивает применение данной схемы КЭУ. Известно применение таких систем на автобусах [4], но они мало пригодны для условий железнодорожного транспорта.

В случае пневматической передачи в качестве рабочего тела используется воздух и (или) продукты сгорания топлива. От предыдущих типов передач она отличается тем, что это единственный тип передачи, который может повысить КПД на колесе по сравнению с КПД исходного двигателя за счет регенерации энергии выхлопных газов [5].

Во всех рассмотренных случаях система оказывается громоздкой и проигрывает по сравнению с традиционной по объему и массе СУ даже с учетом уменьшения установленной мощности первичного двигателя и запаса топлива. Это происходит из-за того, что первичный двигатель (дизель с КШМ) имеет ограниченные возможности и лишние звенья передач и преобразователей. В результате поступательное движение поршня ДВС преобразуется во вращательное коленчатого вала, а затем вращательное движение приводного вала гидронасоса или компрессора в поступательное движение плунжера или поршня.

Очевидно, что вращательное движение здесь лишнее. Оно приводит:

- к увеличению массы, объема и стоимости СУ;
- к увеличению потерь при преобразовании поступательного движения во вращательное и обратно;
- накладывает дополнительные ограничения на параметры рабочего процесса первичного двигателя.

Если поршни первичного двигателя и преобразователя (генератора) соединить, то получим свободнопоршневой двигатель-генератор, т.е. свободнопоршневой двигатель-гидронасос (СПДГН), свободнопоршневой двигатель-компрессор (СПДК), свободнопоршневой двигатель-линейный электрогенератор, или генератор рабочего тела в виде продуктов сгорания. Возможна комбинация всех перечисленных вариантов.

Применение СПД позволяет убрать лишние звенья и существенно повысить КПД расчетного режима (до $\eta_e = 0,54 - 0,58$). Устраняются также причины, вызывающие в обычных ДВС значительные отклонения от расчетных режимов. Здесь, прежде всего, следует напомнить, что СПД на переходных режимах не дымит в принципе. По уровню эффективного КПД, но не эксплуатационного, конкуренцию СПД могут составить лишь топливные элементы. Однако, в отличие от топливных элементов СПД не чувствителен к топливу и может работать на природном газе с воспламенением от сжатия (не требует запальной дозы дизельного топлива, свечи, форкамеры и т.п.), что существенно упрощает топливную аппаратуру и всю СУ в целом. Длительные режимы холостого хода либо исключаются (пусковые качества СПД это позволяют), либо средневзвешенная частота циклов доводится до уровня 10 в мин, что в 30 - 35 раз уменьшает расход топлива на холостом ходе по сравнению с тепловозными дизелями. Тепловой режим обеспечивается рециркуляцией выхлопных газов или с помощью теплового аккумулятора. Поэтому эксплуатационный КПД КЭУ может достигать 40 – 45%.

Мощность первичного двигателя КЭУ можно подбирать по различным принципам. Можно устанавливать двигатель по максимальному, известному из практики, коэффициенту использования мощности, а все тяговые режимы обеспечивать за счет накопителей энергии с первоначальной их зарядкой при экипировке. Возможен вариант аналогичный предыдущему, но без учета в коэффициенте использования мощности режимов холостого хода. В описанных случаях мощность первичного двигателя составит 20 - 60% от ныне применяемых. Остальные режимы должны обеспечить накопители энергии.

Другой подход - при заданной энергоемкости накопителя и максимальной длительности номинального и близких режимов определяется избыточная в эксплуатации мощность первичного двигателя. Наиболее рационально емкость накопителя определять по условиям полной рекуперации энергии торможения с учетом полной массы и условий эксплуатации локомотива.

В 1989 – 1991 гг. на кафедре «Локомотивостроение» ХПИ проводились НИОКР по созданию аккумуляторных локомотивов для нужд металлургической промышленности (по заказу транспортного управления Минчермет и Минмет СССР). Широкие технико-экономические исследования подтвердили высокую эффективность аккумуляторных локомотивов и позволили определить наиболее перспективное направление совершенствования СУ локомотивов.

Несмотря на то, что наиболее энергоемким в настоящее время является тепловой аккумулятор с фазовым переходом, наилучшие показатели получены для локомотива с пневматическим аккумулятором (ПА), а не для пароводяного аккумулятора (кроме сосуда высокого давления требуется еще теплоизоляция), к тому же снимается проблема замерзания арматуры. Расчеты показали, что для обеспечения работы локомотива в режиме тепловоза ТГМ-6 на металлургическом предприятии в течение 12 часов необходимо иметь на борту ПА объемом не менее 16 м^3 с начальным давлением 15 МПа (150 кг/см^2). Найденные компоновочные решения позволили вписаться в габариты тепловоза ТГМ-6 при сохранении нагрузки на ось. Применение композитных баллонов вместо стальных позволяет увеличить давление в ПА до 25 – 32 МПа и соответственно увеличить энергоемкость.

Установкой первичного двигателя - компрессора мощностью 600 л.с. обеспечивается необходимая автономность локомотива. Наилучшие показатели получены для СПДК, у которого и выхлопные газы и сжатый воздух срабатываются на одной и той же поршневой РМ. Эффективность еще больше возрастает, если продукты сгорания после РМ подогревают сжатый воздух. Среднеэксплуатационный КПД локомотива составляет $\eta_{\text{с}} = 0,409$ при

эффективном КПД СПД $\eta_{\text{СПД}} = 0,496$. Работа в закрытых помещениях осуществляется только на сжатом воздухе.

Применение СПД в качестве первичного двигателя – генератора в КЭУ является логичным шагом дальнейшего повышения всего комплекса технико-экономических показателей КЭУ. Вне зависимости от области применения СПД обладают следующими проверенными на практике достоинствами:

- организация и условия протекания рабочего процесса в СПД обеспечивают высокие КПД и динамические показатели при отсутствии дымления (преимущества свободного поршня в дизеле заключаются в оптимальном теплоподводе, отсутствии ограничений на жесткость и максимальное давление цикла, высокий механический КПД, незначительный (до 10%) провал коэффициента избытка воздуха при набросе нагрузки);

- многотопливность, возможность применения низкосортных, синтетических и альтернативных топлив, свободнопоршневая камера сгорания по этому показателю существенно превосходит и дизели и ГТД;

- динамическая уравновешенность, отсутствие вибраций и фундамента;

- простота, надежность и технологичность конструкции;

- низкие затраты при эксплуатации и ремонте;

- высокие пусковые качества при низких температурах;

- благоприятная тяговая характеристика;

- возможность отключения одного или нескольких СПД без остановки остальных;

- возможность повышения давления наддува и максимального давления сгорания;

- удобство компоновки в пространстве. Модульный принцип компоновки.

Однако из практики известно, что для СПД не всегда удается найти приемлемое (прежде всего, по эффективности и надежности) решение. Широкое применение нашли лишь устойчивые саморегулирующиеся системы (свайные дизель - молоты, СПДК и т.п.). Наиболее противоречивые мнения существуют о газотурбинной установке со свободнопоршневым генератором газа (ГТУ с СПГТ).

А.С.Орлин и М.Г.Круглов указывали [6] на следующие недостатки ГТУ с СПГГ, обусловленные трудностями:

- обеспечения тепловой стойкости деталей поршневой группы, работающей при повышенных давлениях в цилиндре;
- организации процессов газообмена и смесеобразования в специфических условиях свободного движения поршней;
- регулирования и автоматизации управления СПГГ;
- достижения эффективной работы самодействующих клапанов поршневых компрессоров при высокой цикличности;
- обеспечения надежной работы механизмов синхронизации;
- уменьшения износа основных движущихся деталей;
- снижения уровня шума при работе двигателя;
- равномерного распределения масла по рабочим поверхностям.

Кроме того, ряд авторов указывает на такие недостатки, как:

- низкая экономичность [7];
- сравнительно низкие массогабаритные показатели [8];
- сложность доводки [9];
- сложная топливная аппаратура [8].

Одно только сравнение преимуществ и недостатков обнаруживает противоречия и оттенок субъективизма. В настоящее время все недостатки либо преодолены, либо отпали в процессе общего развития двигателестроения.

Диаграмма возможных режимов работы СПД в составе КЭУ [2] позволяет выбрать оптимальные параметры рабочего процесса, произвести сравнительную оценку эффективности различных типов комбинированных энергоустановок и объяснить причины многих неудач при создании СПД. К числу наиболее существенных ошибок относятся:

- необоснованный выбор параметров номинального режима;
- переход на постоянный ход поршня с форсированием дизеля СПД;
- завышенное отношение диаметров компрессорного и дизельного поршней;

- нерациональная схема газообмена;
- нерациональный выбор расширительной машины.

Кроме того, корректная постановка вопроса экономичности СУ не ограничивается сравнением расхода топлива в стендовых условиях, а включает все составляющие эксплуатационных затрат в частности, эксплуатационный КПД и цену топлива, причем отпадает необходимость в производстве жидких топлив из газов, т.к. СПД обеспечивают наиболее эффективную работу на газе с воспламенением от сжатия.

Сравнение массогабаритных показателей при одинаковом давлении наддува некорректно, т.к. область рационального использования ГТУ с СПГГ лежит по давлению наддува существенно выше, чем у кривошипных дизелей. Сравнение же показателей при одинаковых: коэффициенте избытка воздуха для сгорания, доле потерянному ходу по окнам вообще лишено смысла, т.к. массогабаритные показатели СПГГ от этих параметров не зависят [10], что, кстати, существенно упрощает доводку.

Конструктивные недостатки объясняются не доведенностью (в смысле сопоставимых с дизелями затрат на доводку) или скороспелыми решениями. В построенных конструкциях механизма синхронизации не учтены особенности его работы под действием реальных нагрузок. Топливная аппаратура аккумуляторного типа в настоящее время это уже не недостаток. Шум всасывания был обусловлен особенностями конструкции воздушного тракта и, прежде всего, резонансным наддувом, который в настоящее время применяется лишь на гоночных автомобилях. Применение самодействующих клапанов обусловлено их простотой, поэтому ресурс обеспечивается заменой при соответствующем техническом обслуживании. Применение приводных клапанов увеличивает ресурс и КПД, но одновременно и стоимость.

Не менее важную проблему для построенных СПД создает их узкая специализация. Поэтому производственные издержки оказываются существенно выше, чем в ДВС серийного производства. Для сокращения издержек необходимо создавать класс свободнопоршневых машин с единым

конструктивным исполнением, например, СПДК, автономный наддувочный агрегат, свободнопоршневой дизель-гидронасос и т.д. в едином модуле. Модульный принцип компоновки также снижает издержки. Этому же способствует снижение установленной мощности в гибридных СУ и правильный выбор РМ.

В общем случае в КЭУ СПД может использоваться в двигательном, генераторном или комбинированном режиме. В двигательном режиме вся энергия потребляется на привод электрогенератора, гидронасоса или компрессора. В генераторном режиме вся энергия дизеля тратится на наддув (производство рабочего тела в виде продуктов сгорания). Мощность генераторного режима в 4 и более раз выше двигательного. С учетом того, что и в двигательном (с пневмопередачей) и в генераторном режиме используется один и тот же компрессор легко осуществить работу по комбинированной схеме с переходом на малых нагрузках и холостом ходе в компрессорный режим с высоким индикаторным КПД.

Для СПД, работающих в генераторном режиме, принципиальное значение имеет отношение диаметров компрессорного и дизельного поршней. При отношении диаметров более 2 (а по условиям вписывания механизма синхронизации не удастся получить отношение менее 2,26) удельная мощность СПД практически не зависит от коэффициента избытка воздуха и доли потеряннного хода по окнам [10]. Т.е. одно и то же значение удельной мощности СПД можно получить при различных (могут отличаться в 2 – 3 раза) значениях среднего индикаторного давления, коэффициентов избытка воздуха, продувки, остаточных газов. Следовательно, можно максимально дефорсировать дизель СПД, увеличить степень сжатия, снизить тепловые и газодинамические потери и увеличить КПД.

Опытно – экспериментальные работы по доводке рабочего процесса свободнопоршневого газового дизеля с воспламенением от сжатия указывают, что это направление весьма перспективно, как по экономическим, так и по экологическим показателям. В области максимальных давлений цикла более 20

– 22 МПа существует устойчивый, бездетанационный, с воспламенением от сжатия процесс сгорания смеси ПГ с воздухом в широком диапазоне коэффициента избытка воздуха. Это является основным залогом успеха в решении проблем экологической безопасности современных двигателей и определяет перспективу на будущее, в том числе, в области водородной энергетики, т.к. индикаторный КПД цикла в этих условиях превышает 63 %.

Таким образом, современный уровень развития теории рабочего процесса СПД убедительно доказывает, что все неудачи при создании СПД обусловлены ошибками теоретического характера, а механический перенос некоторых основных положений теории рабочего процесса ДВС на СПД недопустим.

При создании СПД необходим учет особенностей и одновременное решение задач статического (работа на установившихся режимах) и динамического (работа на переходных режимах, которые могут составлять доли секунд) синтеза этих двигателей. В противном случае либо создаются неработоспособные конструкции, которые не выходят из стадии доводочных работ, либо конструкция оказывается с рядом недостатков, которые сводят на нет эффективность использования СПД. Игнорирование этих факторов приводит к неоправданному затягиванию доводочных работ. Сложность задачи динамического синтеза заключается в том, что регулирующие устройства необходимо создать еще до начала доводочных работ, т.е. когда характеристики объекта регулирования еще неизвестны.

В динамическом плане СПД представляют нелинейные автоколебательные системы с жестким самовозбуждением. Достаточные условия устойчивости автоколебаний поршня, способы регулирования и обеспечения устойчивой работы СПД рассматриваются в специальной литературе. Современный уровень развития теории автоматического регулирования применительно к СПД развит в достаточной мере для успешного решения этих проблем.

В СПД жесткость рабочего процесса и максимальное давление цикла не ограничены в привычном для ДВС с КШМ смысле. Жесткость рабочего процесса в СПД автоматически ограничивается благодаря отрицательной обратной связи

между скоростью нарастания давления при сгорании и скоростью свободно движущегося поршня при его подходе к ВМТ. Поэтому подвод тепла производят при оптимальном опережении начала сгорания.

Описанная обратная связь и возможность эффективного управления положением ВМТ поршня (степенью сжатия) обуславливают функциональную многотопливность СПД. Это единственный тип двигателя, который может работать с воспламенением от сжатия на газах широкого фракционного состава, включая «жирные» природные газы, попутные нефтяные, генераторные, пиролизные газы, водород, шахтный метан, биогаз, а также сырой нефти с содержанием серы до 4 %. В двигателе с КШМ изменение содержания метана в смеси на 0,5 % по объему приводит к срыву процесса сгорания с воспламенением от сжатия вследствие падения показателя политропы сжатия. При свободном поршне снижение показателя политропы автоматически (поршень остановится в ВМТ только при соблюдении баланса работ за обратный ход) увеличит степень сжатия вплоть до воспламенения топлива.

Среди типов передач в КЭУ наибольший практический интерес представляет пневматическая передача, позволяющая утилизировать энергию выхлопа первичного двигателя. При мощности КЭУ до 1 – 3 МВт в качестве тягового двигателя наиболее рациональна (по КПД и стоимости) ОРМ с воздушным охлаждением. Последнее обусловлено тем, что в прямом процессе температура рабочего тела существенно ниже, чем в ДВС, а при рекуперативном торможении необходимо максимально охлаждать ОРМ, работающую в компрессорном режиме при незначительном температурном перепаде с внешней средой. Поэтому наиболее просто построить ОРМ на элементной базе двигателей с регулируемым воздушным охлаждением. Существующие дизели воздушного охлаждения легко конвертируются в ОРМ однократного действия.

Для наземных транспортных установок требуется рекуперативное торможение и регулирование фаз газораспределения. По условиям вписывания в моторное отделение транспортного средства при существенном упрощении

конструкции наибольший интерес представляют ОРМ двойного действия, выполненные по схеме 2V90 (двухцилиндровая V-образная ОРМ с углом развала 90°). В этом случае обеспечивается непрерывный тяговый момент на колесе с нулевых оборотов, а запас крутящего момента 2,6 – 5 позволяет убрать коробку передач или её упростить. Конструктивно ОРМ легко конвертируется в звездообразную схему с числом цилиндров до 9, что обеспечивает пропорциональное увеличение мощности при высокой степени унификации. В этом случае удастся существенно улучшить весь комплекс показателей стационарных и транспортных СУ различного назначения. Так как давление перед РМ существенно ниже максимального давления цикла в двигателе и отсутствует сгорание рационально выполнить РМ двойного действия с дифференциальным поршнем, чтобы не увеличивать габарит вводом крейцкопфа, и применить подшипники качения. Последнее в сочетании с гидропневматическим приводом клапанов и электронным управлением позволяет существенно повысить механический КПД ОРМ по сравнению с дизелем.

Объем и масса РМ зависят от давления рабочего тела на входе, быстроходности и глубины регулирования по крутящему моменту. РМ для непосредственной передачи крутящего момента на осевые редукторы с запасом крутящего момента по тяговой характеристике 11 – 14 получается громоздкой и существенно снижает объем ПА. Разбивка тяговой характеристики на два диапазона (как у тепловозов типа ТГМ) позволяет уменьшить объём ОРМ в 3 – 4 раза. Применение упрощенных (без гидротрансформаторов) гидропередач, а также электропередач позволяет уменьшить необходимый запас крутящего момента и соответственно массу РМ. С учетом условий эксплуатации маневрового локомотива (доли времени и средней скорости движения) из условия равного ресурса основных узлов и агрегатов предпочтительны быстроходные РМ с понижающим редуктором.

Применение унифицированной электропередачи позволяет создавать маневровые локомотивы и дизель – поезда двойного питания (от контактной

сети или автономной КЭУ).

С целью снижения производственных и эксплуатационных издержек рационально КЭУ выполнять из нескольких модулей. Необходимая проектная мощность локомотива обеспечивается установкой соответствующего количества модулей. Максимальное количество модулей, применявшееся на практике 16, но известны проекты и на 64 модуля. Очевидно, что при этом перекрывается весь диапазон мощностей тягового подвижного состава модулем одной размерности, что существенно повысит эффективность его эксплуатации. С точки зрения повышения ресурса и эксплуатационного КПД (за счет отключения модулей) рационально увеличивать количество модулей кратно позициям контроллера машиниста. Современная автоматика справляется с задачей запуска и вывода на режим модулей в соответствии с положением контроллера машиниста и уровнем зарядки аккумуляторов. Включение модулей можно производить из условия равномерной выработки ресурса или преимущественная выработка ресурса отдельными модулями с их заменой при очередном техническом обслуживании или текущем ремонте. Очевидно, что в этом случае суммарный ресурс увеличивается пропорционально доле холостого хода и количеству модулей.

Практический интерес представляют два типоразмера модулей СПД на основе серийно выпускаемых комплектующих. Первый типоразмер на основе гильзы цилиндра двигателя ДН 12/2*12 мощностью (КСПД) 150 – 400 кВт для мощностного диапазона 150 – 3200 кВт. Второй - на основе гильзы цилиндра диаметром 318 – 320 мм мощностью 2,5 – 5 МВт для мощностного диапазона 2,5 – 40 МВт. Очевидно, что единая элементная база (два типоразмера на весь диапазон мощностей автономного подвижного состава) существенно упрощают эксплуатацию и снижают издержки не только в эксплуатации, но и при создании.

В настоящий момент разработана рабочая документация на единый модуль такого двигателя на основе деталей и узлов серийного дизеля. С целью снижения производственных и эксплуатационных издержек модуль СПД

создан для широкого функционального применения. Мощность модуля (150 – 400 кВт) выбрана таким образом, чтобы перекрыть весь диапазон мощностей применяемых и перспективных маневровых локомотивов и дизель - поездов.

В случае замены дизеля тепловоза ТГМ6 на КЭУ по схеме на рис.1 СУ включает 2 СПД 1МП120 мощностью по 400 кВт, ОРМ максимальной мощностью 1200 кВт и серийный ТК. В габаритах моторного отделения дизеля размещается КЭУ (объём 1,5 м³, масса до 1,3 т), эквивалентный запас СПГ и остается 9 м³ пространства для размещения ПА и теплового аккумулятора – регенератора. При этом в гидропередаче отсутствуют гидротрансформаторы и связанные с ними потери.

Для развития полной мощности КЭУ 1200 кВт в течение 30 мин требуется 9 баллонов емкостью 400 л с давлением 25 МПа при срабатывании всего перепада без дросселирования. Масса одного стального баллона 650 кг, композитного 217 кг. Свободного пространства достаточно для размещения этих баллонов. Кроме того, впрыском воды допустимую по термонапряженности длительную мощность СПД можно увеличить на 60 %.

За счет уменьшения тепловых потерь в систему охлаждения и установленной мощности СПД уменьшается объём и мощность потребителей системы охлаждения.

С применением СПД отпадает необходимость в специальном тормозном компрессоре, т.к. производительность компрессоров СПД на режимах более 6 % номинальной мощности превышает номинальную производительность применяемых тормозных компрессоров, а объём воздуха в ПА на 1 – 2 порядка превышает запас тормозного воздуха в главном резервуаре.

Запуск СПД пневматический, поэтому ёмкость и количество аккумуляторных батарей существенно снижается, а их срок службы увеличивается.

С точки зрения увеличения ресурса главной (тяговой) ОРМ для обеспечения вспомогательных нужд на холостом ходе рационально применять вспомогательную ОРМ, питаемую от работающего модуля или от ПА.

Конструкция СПД допускает переход на частичных нагрузках в режим дизель - компрессора при наивысшем КПД получения сжатого воздуха [11, 12] и без дополнительных агрегатов.

Следовательно, на маневровом локомотиве имеется достаточно места для размещения дополнительных объёмов ПА и СПГ.

В случае дизель - поезда массой 260 т (4 вагона) типовой тяговый расчет показывает, что при касательной мощности 640 кВт (мощность по дизелям 1010 кВт) поезд разгоняется до скорости 100 км/час за 4,1 мин и проходит при этом расстояние 4,8 км. Для обеспечения данного режима только на сжатом воздухе потребуется 2 – 3 баллона емкостью 400 л соответственно с давлением 32 – 25 МПа. В случае последовательно – параллельной работы ОРМ (сначала только на продуктах сгорания от СПД, а затем и сжатом воздухе) с удвоенной касательной мощностью время разгона уменьшается до 1,8 мин, а необходимая емкость баллонов уменьшается в 2,8 раза. С точки зрения экологической обстановки на станции предпочтительнее режим трогания только на сжатом воздухе, а затем запуск СПД. При длине санитарной зоны 1 км и последовательной работе потребуется аналогичная емкость баллонов. Отсутствие вибрации и малая высота агрегатов позволяют размещать КЭУ под вагоном дизель – поезда, увеличивая количество пассажирских мест.

С увеличением мощности экономичность КЭУ возрастает, а при мощностях выше 1 – 3 МВт вместо ОРМ рационально применять силовые турбины. Однако при этом возникают проблемы с рекуперацией энергии торможения. Другой возможный путь – установка ОРМ мощностью 1000 – 1200 кВт на каждую тележку. В этом случае унифицируются СУ маневровых и магистральных локомотивов, снижается стоимость и нагрузка на ось.

Применением без компрессорных СПД полностью устраняется система охлаждения, а удельная масса КЭУ снижается до уровня авиационным ГТД. Однако при этом снижается эффективный КПД КЭУ до уровня 45 – 47 %.

Для сравнительной оценки в таблице приведены основные данные СУ локомотивов. Температура продуктов сгорания перед РМ не превышает 800°С,

т.е. ниже, чем в среднеоборотных дизелях в начале выпуска. При работе на воздухе температура еще ниже, что позволяет создать РМ из традиционных материалов, практически без охлаждения.

При расчете параметров КЭУ входное давление перед РМ принято 17 бар. При таком давлении уровень форсировки дизеля СПД по среднему индикаторному давлению соответствует тепловозному дизелю Д49. Масса дополнительного дизельного топлива приведена из условия одинаковых поездных работ и периодов между экипировками.

Тип силовой установки	ГТУ с СПГГ	ГТД НК-361	КЭУ	ГТД1000	КЭУ
Локомотив	ГТ-101	ГТ1		ГЭМ10	
Состав силовой установки	4 СПГГ ОР-95 и силовая турбина	Двухвальный ГТД со свободной силовой турбиной	2 СПД ПЗ18, силовая турбина, турбокомпрессор		2 СПД 1МП120, объёмная РМ, турбокомпрессор
Максимальная мощность, кВт	2206	8300	10100	1000	1200
Температура газа перед турбиной, К	800	1157	1056	1220	1070
Расход воздуха, кг/с	9,2	56,5	22	5	2,3
Масса СУ, т	27		12	5	1,2 (без ПА)
Дополнительное топливо, т	3,9	7,4	0		

Таким образом, применение КЭУ на базе СПД позволяет улучшить весь комплекс технико-экономических показателей СУ различного назначения и решить назревшие проблемы двигателестроения и железнодорожного транспорта. Современные апробированные технические решения позволяют поднять эксплуатационный КПД транспортных СУ выше 40%, эффективный выше 51 – 56 %, снизить объём силовой установки, до уровня, достаточного для размещения необходимого запаса природного газа.

Литература

1. Синенко Н.П., Струнге Б.Н., Резник И.И. Тепловозный дизель Д70. – М.: Транспорт, 1966, 64 с.
2. Петров П.П. Диаграмма возможных режимов работы комбинированных энергоустановок.
3. Газотурбовоз ГТ-101 мощностью 3000 л.с. со свободнопоршневыми генераторами газа и гидравлической передачей. – Луганское областное издательство, 1961. – 16 с.
4. Дубровин В.Ю. Комбинированные энергетические установки транспортных машин с рекуператорами. - М.: 1991. -61 с.: ил.. - (П. Легковые автомобили и автобусы: Обзор. информ./ НИИСтандартавтосельхозмаш).
5. Глаголев Н.М. Тепловозы. – М.: Трансжелдориздат, 1948, 388 с.
6. Орлин А.С., Круглов М.Г. Комбинированные двухтактные двигатели. – М.: Машиностроение, 1968, 576 с.
7. Нигматулин И.И. Рабочие процессы в турбопоршневых двигателях. – М.: Машгиз, 1962, 315 с.
8. Чаромский А.Д. Некоторые проблемы создания турбопоршневых двигателей и пути ускорения их доводки. – Изв. ВУЗов «Машиностроение», № 1, 1962, с.14 – 19.
9. Васильев В.Д., Соложенцев Е.Д. Кибернетические методы при создании поршневых машин.- М.: Машиностроение. 1978.- 120 с.
10. Петров П.П. Свободнопоршневые двигатели – проблемы и перспективы. – Двигателестроение, 1988, № 4, с. 3 – 5.
11. Пульманов Н.В. Дизель - компрессоры со свободно движущимися поршнями. - М.: Машгиз. 1959.- 284 с.
12. Свободнопоршневые двигатель - компрессоры для газовой промышленности. / Васильев Ю.Н., Ксенофонов С.И., Стрелков В.П., Строганов Е.К. – Газовая промышленность, 1992, № 2, с.17 – 18.