

### Свободнопоршневые двигатели для газовой промышленности.

Проблема снижения энергоёмкости национального продукта требует внедрения энергоэффективных технологий во все сферы народного хозяйства. Это особенно актуально для топливно - энергетического комплекса, обеспечивающего 25 % ВВП. Проблема Северного завоза, когда приходится доставлять бензин и дизельное топливо при наличии на местах нефти и различных газов (природного, попутного нефтяного, шахтного метана, генераторного, пиролизного и т.д.), порождена недостаточной многотопливностью существующих силовых установок (СУ).

Указанные проблемы успешно решаются с помощью свободнопоршневых двигателей (СПД), которые характеризуются следующими проверенными временем и практикой преимуществами:

- 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, включая различные газы и сырую нефть; свободнопоршневая камера сгорания по этому показателю существенно превосходит и дизели и газотурбинные двигатели (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 СУ с СПД;

- 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, свободнопоршневые дизель - компрессоры (СПДК) и т.п.).

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 кривошипных ДВС на СПД недопустим. К числу наиболее существенных ошибок относятся:

- неудачный (с точки зрения статического и динамического синтеза СПД) выбор параметров номинального режима;

- переход на постоянный ход поршня с форсированием дизеля СПД;

- завышенное отношение диаметров компрессорного и дизельного поршней, ухудшающее нагрузочные характеристики;

- не оптимальная схема газообмена;

- нерациональный выбор расширительной машины.

Несмотря на допущенные ошибки газотурбинные установки со свободнопоршневыми генераторами газа (ГТУ с СПГ) оказались весьма эффективными для северных условий благодаря использованию дешевых топлив (мазут с содержанием серы до 4 % и сырая нефть).

Применительно к технологическим процессам в газовой промышленности практический интерес представляют следующие варианты использования СПД:

- газогенераторы,

- СПДК,

- комбинированные (гибридные) энергетические установки (КЭУ или ГСУ).

Эффективность СПД в качестве генератора энергоносителя для технологических целей общеизвестна [ 1, 2 ]. В качестве генераторов синтез – газа СПД также имеют существенные преимущества по энергоэффективности и удельной массе [ 3 ]. За счет регулирования коэффициента остаточных газов (коэффициент продувки меньше 1) и степени сжатия СПД оказывается весьма эффективным и легким источником безопасных газов. В качестве последних могут использоваться продукты сгорания с содержанием кислорода 0,3 – 8 % по объёму. Заданное допустимое содержание кислорода соответствует продуктам сгорания ДВС, у которых коэффициент избытка воздуха при сгорании не более 1,6 ( $\alpha < 1,6$ ). Для удовлетворения этому условию давление безопасных газов должно быть более 23 - 25 бар. При меньшем давлении у дизеля СПД должен быть дополнительный потребитель, иначе не обеспечивается баланс работ за ход поршня и цикл в СПД. Ограничение по содержанию сажи накладывает дополнительные условия на организацию рабочего процесса. В дизелях границей дымления считается  $\alpha = 1,25$ . Поэтому применение тяжелых жидких топлив ограничено этим условием. Безсажевый процесс сгорания газообразных гомогенных смесей с воспламенением от сжатия в широком диапазоне  $\alpha$  вплоть до 0,25 возможен только в СПД.

Оптимальное по производительности давление газа 22 – 25 бар, при этом не требуется компрессор для его сжатия, т.к. безопасный газ непосредственно выходит из выхлопной системы при данном давлении. Разработанный СПД модели 1МП120 в режиме генератора безопасного газа имеет производительность до 35 м<sup>3</sup>/мин при давлении 23 – 25 бар.

В случае СПДК преимущества СПД проявляются в полной мере. Малые габариты и масса, абсолютная уравновешенность (не требуется фундамент), автономность в работе, хорошие экономические показатели, легкий и надежный пуск ставят подобные машины вне конкуренции, особенно на транспортных передвижных установках [4, 5]. Затраты на 1 м<sup>3</sup> вырабатываемого сжатого воздуха или газа у СПДК в 1,5 – 2 раза ниже, чем у приводного поршневого компрессора равной производительности.

В настоящее время отечественная промышленность выпускает серийно два типа СПДК: ДК-2 (мощностью 43 кВт на конечное давление 230 бар) и ДК-10 (95,7 кВт, 400 бар). Эти СПДК узко специализированы (рабочая среда – воздух, минимальное давление нагнетания 50 бар), поэтому производственные издержки слишком велики. Конструкция данных СПДК не допускает их модернизацию в соответствии с требованиями современного рынка и достижениями в области компрессоро- и двигателестроения, т.к. это потребует замены до 80 % деталей, что равносильно созданию новой конструкции. Последнее выглядит предпочтительнее, т.к. можно использовать серийные детали и узлы современных дизелей.

Показатель энергоёмкости компрессоров, применяемых на АГНКС с давлением на входе 4 – 12 бар и давлением нагнетания 230 - 250 бар составляет 16,5 – 26 кВт/нм<sup>3</sup>·мин. У действующих СПДК этот показатель равен 15 – 17 кВт/нм<sup>3</sup>·мин (находится у нижнего предела) и может быть снижен за счет оптимального управления рабочим процессом. Основным источником повышения эффективности СПДК это его дизель, КПД которого существенно выше всех других типов приводных двигателей (с учетом КПД преобразования энергии топлива и КПД её передачи к компрессору). Эксплуатационный КПД дизеля и СПДК можно существенно повысить за счет регулирования степени сжатия в дизеле, глубокой утилизации энергии выпуска, применения альтернативных топлив и систем воспламенения, регулирования подачи компрессора и др.

Для регулирования степени сжатия и поддержания оптимальных параметров дизеля необходима минимум одна буферная полость (у ДК-2 и ДК-10 она отсутствует), тогда можно использовать регулятор степени сжатия и поддерживать на всех режимах максимальный КПД. Частоту циклов холостого хода, а, следовательно, и расход топлива, можно понизить на порядок за счет регулирования задержки поршня в наружной мертвой точке (НМТ).

Эффективная работа на природном газе (ПГ) с высокими экологическими показателями возможна лишь в случае воспламенения от сжатия, что существенно упрощает топливоподающую аппаратуру, но требует управления

степенью сжатия и приводит к увеличению максимального давления цикла до 280 – 320 бар (у ДК-2 цилиндр рассчитан на 175 бар).

Материалоёмкость электроприводных компрессоров составляет 20 – 35 кг/кВт, газомокомпрессоров типа ГМ-8, 10ГКМ превышает 55 кг/кВт. У СПДК этот показатель составляет 10 – 15 кг/кВт и может быть снижен до 5 кг/кВт. С учетом дефицита электроэнергии и стоимости технических условий на подключение к электросетям, которая соизмерима со стоимостью электростанции соответствующей мощности, предпочтительны поршневые компрессоры с приводом от газового ДВС. Поэтому наиболее рациональным, особенно для вновь возводимых объектов, является СПДК, работающий на природном газе. Это позволяет существенно снизить производственные и эксплуатационные затраты, а также сократить объём и сроки капитального строительства.

За счет применения турбонаддува в СПДК одной размерности обеспечивается диапазон номинальных мощностей 43 – 100 % от максимальной, что существенно снижает производственные издержки. На базе разработанного СПД 1МП120 путем применения дополнительных воздушных и газовых ступеней сжатия, которые могут быть сменными, можно получить СПДК (масса 550 кг) с номинальной мощностью 45 – 100 кВт. Аналогично для СПД модели П318 получается СПДК мощностью 450 – 1000 кВт (масса 5800 кг). Промежуточные мощности можно перекрыть за счет нескольких модулей, чтобы не создавать всю линейку СПДК.

При использовании нескольких модулей количество ступеней в СПДК можно уменьшить, за счет последовательного сжатия в разных СПДК. Двухступенчатый СПДК позволяет существенно повысить эффективность передвижного автомобильного газового заправщика (ПАГЗ), как за счет перекачки остаточного газа низкого давления, так и за счет его использования в дизеле СПДК. СПДК также можно совместить с тяговым двигателем ПАГЗ, заменив его поршневой расширительной машиной.

Практический интерес могут представлять и СПДК мощностью до 2,5 кВт в качестве индивидуальных АГНКС производительностью до 3 заправок в сутки, с использованием газа низкого давления из бытовой сети. Основное требование к такому СПДК – низкая стоимость, что достигается существенным упрощением конструкции.

При мощности компрессорной станции выше 2 – 4 МВт рационально применять лопаточные (ротационные) компрессоры с приводом от комбинированных энергетических установок (КЭУ), которые в настоящее время представляют наиболее перспективное направление в развитии стационарных и транспортных СУ, что подтверждается масштабами работ в этой области. Однако в рамках традиционных поршневых двигателей не удастся существенно снизить массу и габаритные размеры СУ, т.к. это требует увеличения давления наддува в несколько раз, а у кривошипно-шатунного механизма (КШМ) практически отсутствуют резервы по прочности. Применение СПД в качестве первичного двигателя – генератора в КЭУ является логичным шагом дальнейшего повышения всего комплекса технико-экономических показателей КЭУ, т. к. позволяет: убрать лишние звенья и связанные с ними диссипативные потери; снять ограничения на параметры рабочего процесса и существенно повысить КПД расчетного режима. Устраняются также причины, вызывающие в обычных ДВС значительные отклонения от расчетных режимов.

В общем случае в КЭУ СПД может использоваться в двигательном, генераторном или комбинированном режиме. В двигательном режиме вся энергия топлива используется на привод электрогенератора, гидронасоса или компрессора. В генераторном режиме вся энергия дизеля тратится на привод поршневого компрессора наддува (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 ходу в компрессорный режим с высоким КПД.

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. Опытные – 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 200 – 220 бар существует устойчивый, бездетанационный, с воспламенением от сжатия процесс сгорания смеси природного газа 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 дизеля СПД может достигать 63%.

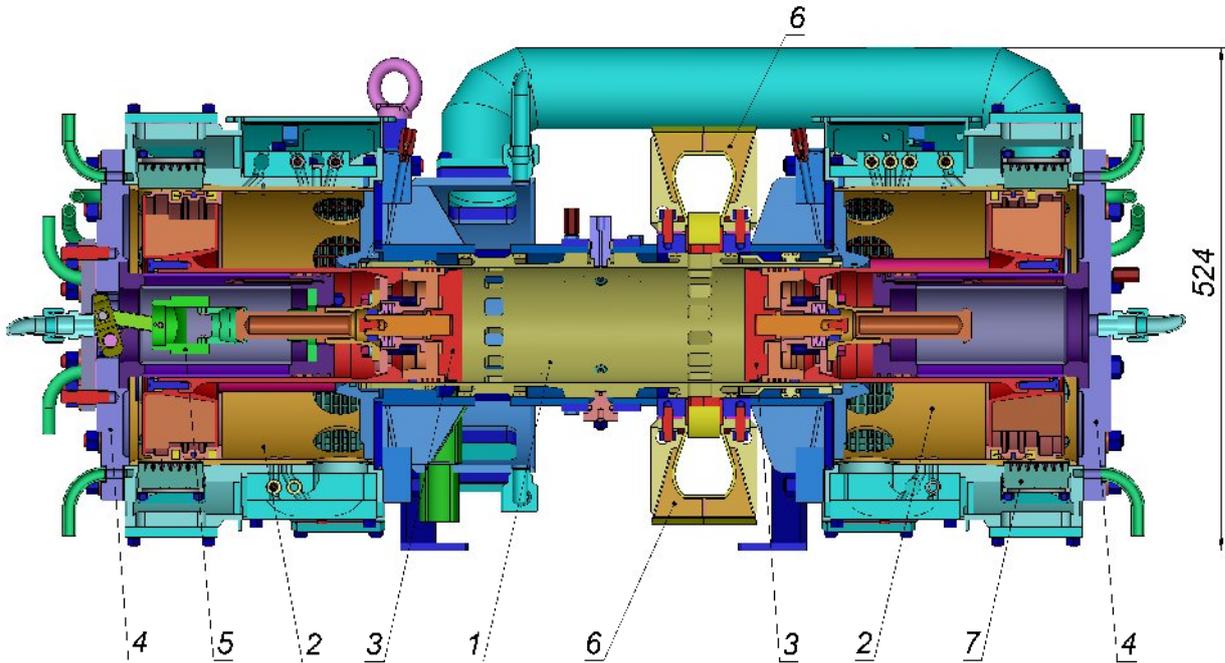
Описанная обратная связь и возможность эффективного управления положением ВМТ поршня (степенью сжатия) обуславливают функциональную многотопливность СПД. Это единственный тип двигателя, который может работать с воспламенением от сжатия на газах широкого фракционного состава, включая «жирные» природные газы, попутные нефтяные, генераторные, пиролизные газы, водород, шахтный метан, биогаз и т.д. В двигателе с КШМ изменение содержания метана в смеси на 0,5 % по объему приводит к срыву процесса сгорания вследствие падения показателя политропы сжатия либо взрывному горению в конце процесса сжатия. При свободном поршне снижение показателя политропы сжатия автоматически (поршень остановится в ВМТ только при соблюдении баланса работ за обратный ход) увеличит степень сжатия вплоть до воспламенения топлива. При раннем сгорании возросшее давление в цилиндре остановит поршень раньше и ограничит максимальное давление цикла. С другой стороны взрывное горение

метана не критично для СПД, т.к. отсутствуют подшипники коленчатого вала и перекладка поршня и колец в зазорах, а газовые силы уравнивают инерционные. Скорость сгорания метана можно понизить за счет баластирования смеси остаточными газами (коэффициент продувки  $< 1$ ), расслоения заряда или подачи газа в конце сжатия.

С целью снижения производственных и эксплуатационных издержек рационально КЭУ выполнять из нескольких модулей. Необходимая проектная мощность СУ обеспечивается установкой соответствующего количества модулей. Максимальное количество модулей, применявшееся на практике 16, но известны проекты и на 64 модуля. Очевидно, что при этом перекрывается широкий диапазон мощностей СУ 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. Очевидно, что в этом случае суммарный ресурс увеличивается пропорционально доле холостого хода и количеству модулей.

Практический интерес представляют несколько типоразмеров СПД на основе серийно выпускаемых комплектующих. На основе цилиндра двигателя ДН 12/2\*12 имеется многофункциональный модуль (мощность в режиме КЭУ 150 – 400 кВт) для мощностного диапазона СУ 150 – 3200 кВт (в режиме СПДК мощность 45 – 100 кВт). На основе цилиндра диаметром 318 – 320 мм проектируется модуль мощностью в режиме СПДК 450 – 1000 кВт или в режиме КЭУ 2,5 – 5,5 МВт для мощностного диапазона 2,5 – 80 МВт. Очевидно, что единая элементная база существенно упрощает эксплуатацию и снижает затраты не только в эксплуатации, но и при создании. Для сокращения издержек необходимо создавать класс свободнопоршневых машин с единым конструктивным исполнением, например, генератор синтез - газа, СПДК, КЭУ и т.д. в едином модуле. Модульный принцип компоновки также снижает производственные и эксплуатационные затраты.

Конструктивно СПД 1МП120 (см.рис.) и ПЗ18 подобны и отличаются масштабными коэффициентами и размерами (жесткостью) подmotorной рамы. Их технические характеристики приведены в таблице.



Продольный разрез СПД 1МП120:

1 – дизель, 2 – двухступенчатый поршневой компрессор, 3 – поршень, 4 – буферная крышка с вытеснителем, 5 – механизм запуска с упора, 6 – выпускные патрубки, 7 – автоматические клапаны.

#### Характеристики симметричных СПД

Тип СПД	1МП120	ПЗ18
Диаметр цилиндра дизеля (реактора), мм	120	318
Длина, мм	1254	3600
Ширина, мм	573	1200
Высота, мм	524	1500
Масса, кг	420	5000
Расход метана в режиме генератора синтез - газа, $\text{нм}^3/\text{час}$	92	1047
Выход синтез – газа, $\text{нм}^3/\text{час}$	449	5109
Мощность в режиме СПДК, кВт	100	1000
Мощность в режиме КЭУ, кВт	400	5000
Эффективный КПД, %	50 – 54	52 – 58

При мощности КЭУ более 1 МВт эффективный КПД не менее 51% в простом цикле, 56% в КЭУ с регенератором и 61% для КЭУ с утилизационным контуром на низкокипящих рабочих телах. Таким образом, КЭУ в 1,5 – 2 раза эффективнее традиционных систем, что особенно важно при отсутствии потребителя тепловой энергии выпускных газов, например, на газоперекачивающих станциях и т.п. Снижение энергопотребления по сравнению с традиционными системами перекачки газа указывает на эффективность данного направления, т.к. позволяет увеличить экспортный потенциал коммерческого продукта на 5 - 8 % при том же объёме добычи.

КЭУ в составе 3-х СПД ПЗ18 (разрабатываемая модель) и силовой турбины имеет массу до 17 т при мощности 16 МВт и свободно размещается в кузове магистрального тепловоза. Температура газов перед силовой турбиной не превышает 750 - 800° С, что обеспечивает её высокий ресурс. Впрыском воды длительную мощность КЭУ можно увеличить на 60 %, т.е. имеется значительный запас мощности на случай нештатных ситуаций, а также для обслуживания модулей СПД без остановки КЭУ.

В заключении отметим, что СПД в составе КЭУ могут найти применение на компрессорных станциях при перекачке газа вместо агрегатов бесперебойного питания на основе электрохимических генераторов требуемой мощности (100 кВт и выше).

Система аварийного (резервного) электроснабжения переменным однофазным или трёхфазным током промышленной частоты состоит в общем случае из свободнопоршневого двигателя-компрессора, пневмоаккумулятора с необходимой пускорегулирующей аппаратурой, поршневой расширительной машины (ПРМ) в комплекте с электрогенератором и блоком управления, обеспечивающим контроль параметров основной электрической сети и пуск электроагрегата при отклонении их от установленных норм. Объём пневмоаккумулятора выбирается из условия требуемого расхода воздуха высокого давления через ПРМ до выхода на режим основного оборудования и

сохранения времен запуска – приема нагрузки по техническим условиям на уровне 0,05 – 0,1 с.

В отличие от систем резервного электропитания на основе электрохимических аккумуляторов, имеющих небольшой ресурс и требующих постоянного обслуживания, предлагаемая система электроснабжения ответственных потребителей энергии переменным током может находиться в дежурном режиме практически без обслуживания в течение многих лет, обеспечивая в кратчайшее время подключение к нагрузке. Так как автоматизированная система резервного электроснабжения построена на модульном принципе, она может быть адаптирована к комплексам ракетной и вычислительной техники, средств связи и аэродромного хозяйства. Основные узлы системы прошли экспериментальную проверку на ряде изготовленных опытных образцов мощностью 5 и 10 кВт для систем жизнеобеспечения в медицине и подтвердили возможность получения требуемых технических характеристик (время выхода на режим составляет 0,07 – 0,1 с), что на несколько порядков меньше времени запуска мотор - генератора.

Конструкторские проработки и технические решения показывают, что предлагаемая КЭУ благодаря существенным преимуществам по энергетическим и массогабаритным показателям может явиться изделием нового поколения СУ грузовых дирижаблей. Интерес к указанным летательным аппаратам проявляют в газовой и нефтяной промышленности, вследствие их неоспоримой эффективности при завозе крупнотоннажных грузов в труднодоступные районы Крайнего Севера, Восточной Сибири и Дальнего Востока. Дирижабль можно использовать при доставке конечных продуктов (сжиженный природный газ, синтетические жидкие топлива, диметиловый эфир) при переработке природного газа на месте его добычи.

Таким образом, для снижения энергоёмкости национального продукта рационально разработать и поставить на производство несколько модификаций СПДК в диапазоне мощностей 100 – 1000 кВт, унифицированных с комбинированными энергетическими установками.

## Литература

1. Акунов В.И. Струйные мельницы.- М.: Машиностроение, 1967.-253 с.
2. Вопросы энергообеспечения эрлифтного комплекса по разработке морских россыпей / В.В. Вознесенский, В.П. Гога, В.С. Пащенко, А.Я. Хесин.- Ежемесячный бюллетень ОТИ объединения Северовостокзолото:- Магадан: Колыма, 1980, №6, с. 26 - 27.
3. Петров П.П. Свободнопоршневые двигатели в технологических установках.- Газохимия, 2008, № 3, с.
4. Свободнопоршневые двигатель - компрессоры для газовой промышленности. / Васильев Ю.Н., Ксенофонтов С.И., Стрелков В.П., Строганов Е.К. – Газовая промышленность, 1992, № 2, с.17 – 18.
5. Пульманов Н.В. Дизель - компрессоры со свободно движущимися поршнями.- М.: Машгиз. 1959.- 284 с.