

### Свободнопоршневые двигатели в технологических установках.

Интерес к свободнопоршневым двигателям (СПД) в качестве технологических установок для различных отраслей народного хозяйства вызван их проверенными временем и практикой преимуществами:

- организация и условия протекания рабочего процесса в СПД обеспечивают высокие КПД и динамические показатели при отсутствии дымления (образования сажи);

- многотопливность, возможность применения низкосортных, синтетических и альтернативных топлив;

- 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 останова 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 ДВС на СПД недопустим.

Применительно к процессам газохимии практический интерес представляют следующие варианты использования СПД:

- комбинированные энергетические установки (КЭУ),

- СПДК,

- газогенераторы.

КЭУ и СПДК в 1,5 – 2 раза эффективнее традиционных систем, что особенно важно при отсутствии потребителя тепловой энергии, например, на газоперекачивающих станциях и т.п. Кроме того, в силу своей многотопливности они обеспечивают утилизацию и термическое обеззараживание отходов газохимического производства. Поэтому могут эффективно встраиваться в различных участках цепочки технологических процессов.

Особую группу СПД представляют генераторы различных газов для технологических целей. Импульсное сжатие газовых смесей в химических

реакторах сжатия (ХРС) широко используется при исследовании процессов химического взаимодействия [ 1 ]. Поэтому периодически предпринимаются попытки применить серийные поршневые двигатели внутреннего сгорания (ДВС) в качестве технологических установок химического синтеза [ 2 - 9 ].

Удобство ДВС с кривошипно-шатунным механизмом (КШМ) заключается в простоте приспособления его к различным условиям протекания реакций при запуске и выходе на рабочий режим. Обратимый или совмещенный электрический двигатель – генератор с современными системами управления позволяет использовать ДВС в качестве реактора для смесей компонентов с различным тепловым эффектом реакции.

По данным [ 10 ] вариант "ракетного" (на основе жидкостных ракетных двигателей) генератора синтез-газа (ГСГ) является более капиталоемким (на 5 – 12 %) в расчете на 1000 нм<sup>3</sup> метана, чем традиционные ГСГ (паровая конверсия и дальнейшие стадии переработки). Минимуму затрат соответствует ГСГ на основе модифицированного дизеля – он более чем на 80 % дешевле традиционных. К сожалению, в этом анализе не учтены свободнопоршневые системы [ 11 - 14 ].

Недостаток ДВС с КШМ заключен в существенных прочностных ограничениях со стороны КШМ на скорость нарастания давления во время реакции и максимальное давление (14 – 16 МПа) в реакторе, чем значительно сужается диапазон возможных типов реакций, составов компонентов и т.д. Согласно [ 5, <http://energosityntop.com>] при создании установок «Синтоп» проблемы обеспечения управляемости и эффективности процессов парциального окисления метана выявились в полной мере. Для получения синтез-газа с составом компонентов, приемлемым для последующей переработки, необходимо воспламенить смесь в объеме до внутренней мертвой точки (ВМТ), чтобы при последующем дожатии температура достигла значений 1900–2100К. Затягивание воспламенения выводит процесс в зону за ВМТ, где наблюдается резкий спад температуры, что сопровождается замедлением скорости реакции, повышенным сажеобразованием, снижением содержания водорода, ухудшением соотношения Н<sub>2</sub>/СО, химическим недожогом метана и повышением концентрации кислорода.

В случае работы ДВС в режиме ХРС применяется внешнее смесеобразование, при котором концентрация метана в воздухе лежит вне зоны взрываемости. Однако сжатие такой смеси в цилиндре за счет изменения показателя политропы дает существенно более низкую температуру, чем традиционное сжатие воздуха. Поэтому применяется предварительный подогрев, а коэффициент избытка окислителя  $\alpha \geq 0,4-0,5$ . Эта область  $\alpha$  характеризуется процессом медленного горения, что сказывается на эффективности ХРС.

Действие перечисленных ограничений и факторов приводит к тому, что синтез – газ получается следующего состава [5, <http://energosityntop.com>] (% об.): Н<sub>2</sub> - 26÷27, СО – 14÷15, СО<sub>2</sub> – 2,5÷3,1, метан – 0,5÷0,7, О<sub>2</sub> <0,5, азот - 50÷55. При синтезе метанола определяющим является парциальное давление реагентов, которое значительно снижается из-за большого содержания азота.

Габаритные размеры и масса компрессора для сжатия синтез – газа до рабочего давления синтеза (50 бар) оказываются на 40 – 50 % больше, чем собственно ГСГ на базе ДВС.

С точки зрения химических технологий КШМ является избыточным звеном, существенно (на 70 и более %) увеличивающим массу и стоимость реактора. С устранением КШМ ДВС превращается в СПД, в котором происходят процессы сходные с процессами в адиабатных одноцикловых установках типа ХРС. Основное отличие заключено в существенной разнице тепловых режимов одноциклового ХРС и длительно работающего на установившемся режиме. Из практики известно [ 15 ], что при переводе СПД с режима холостого хода по мощности на номинальный режим новый тепловой режим устанавливается через 2 минуты после изменения подачи топлива. Разница в тепловом режиме и условиях «закалки» (замораживания) состава компонентов для одноцикловых и длительно работающих ХРС в некоторых случаях может приводить к принципиально отличным результатам.

Для технологических установок химических производств требуется непрерывная длительная стабильная работа ХРС. И здесь начинаются основные трудности, особенно наглядно проявившиеся при создании различных СПД.

На этапе разработки СПД необходим учет особенностей статического и динамического 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.

При создании ХРС кроме задач статического синтеза (работа на установившихся режимах) необходимо одновременно решать и задачи динамического синтеза, т.е. учитывать особенности переходных режимов, которые могут составлять доли секунд. Игнорирование этого фактора приводит к неоправданному затягиванию доводочных работ [ 16 ].

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. Важность этого момента подтверждается тем, что практическое применение нашли лишь устойчивые саморегулирующиеся системы.

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, ГСГ, СПДК, КЭУ и т.д. в едином модуле. Модульный принцип компоновки также снижает издержки.

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.

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. 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.

В технологических установках могут применяться, как симметричные СПД (с двумя синхронизированными поршнями), так и не симметричные (с одним поршнем). Последние существенно проще и имеют в 3 – 5 раз меньшее количество деталей. При выборе рациональной схемы, прежде всего, исключены ГСГ с неуравновешенным поршнем (переменным во времени положением центра масс системы). Чтобы обеспечить работоспособность ГСГ по схеме [ 11 - 14 ] его необходимо устанавливать на упругую опору, а все трубопроводы присоединять через телескопические устройства, оси которых параллельны направлению колебаний или на подмоторную раму массой в 20 - 30 раз превышающую ГСГ.

Для обеспечения устойчивости автоколебаний поршня и расширения функциональных возможностей выбрана схема ГСГ, объединяющая в одном устройстве импульсный адиабатический реактор, приводной двигатель и дожимной компрессор для получения на выходе синтез-газа, заданных давления и температуры. В результате получен свободнопоршневой генератор компримированного синтез-газа (СПГКСГ) [ 17 ], принципиальная схема которого приведена на рис.1.

С целью исключения заброса не прореагировавших компонент исходной смеси и уменьшения энергозатрат принята схема реактора с прямоточной продувкой и полным расширением продуктов реакции.

Приводной двигатель – газовый двухтактный дизель с петлевой продувкой, без охлаждения, с подачей топлива в конце продувки, высоким наддувом, с охлаждением наддувочного воздуха и полной теплоизоляцией камеры сгорания.

Дожимной компрессор – поршневой, одноступенчатый с автоматическими клапанами и перепускными окнами в начале сжатия.

Отличительной особенностью СПГКСГ является высокое максимальное давление цикла (500 бар при запасе прочности 4), что позволяет получить эффективный механизм конверсии углеводородного сырья. Исследовалась область коэффициента избытка воздуха вблизи стехиометрии для получения синтез-газа (для метана  $\alpha = 0,25$ ). Температура смеси в реакторе в начале сжатия не превышает 600 К (327°C), чтобы исключить разложение метана с образованием сажи. Для обеспечения бессажевого процесса максимальная

температура цикла должна быть выше 1800 °С, а для осуществления паровой автотермической конверсии – более 2150 °С.

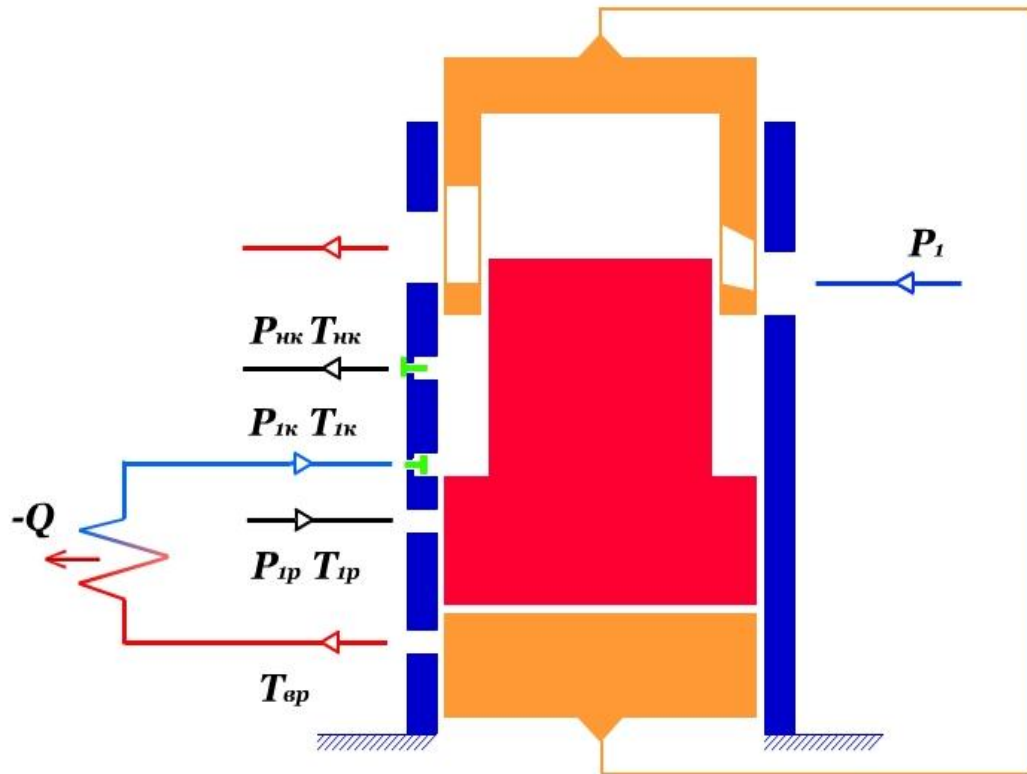


Рис.1. Схема СПГКСГ с прямоточной продувкой реактора, полным расширением, охлаждением и сжатием синтез-газа в компрессоре.  $T$ ,  $p$ ,  $Q$  – соответственно температура, давление и теплоотвод; индексы: к, р, 1 соответствуют компрессору, реактору и параметрам на входе в двигатель.

При повышении максимальных давлений и температур цикла существенно сокращается длительность периода индукции и процесса сгорания [ 18-19 ], что позволяет увеличить допустимую по условиям недогорания компонентов частоту следования циклов, т.е. производительность реактора.

При фиксированном максимальном давлении цикла максимальная температура в реакторе пропорциональна температуре смеси газов на входе, показателю политропы и обратно пропорциональна давлению на входе в реактор. В диапазоне рабочих давлений 0,1 – 50 МПа и температур 600 – 2500 К показатель адиабаты смеси воздух – метан (при  $\alpha = 0,25$ ) не превышает 1,277, а для синтез-газа составляет 1,35 – 1,37 (определены по методике [ 20 ]). Поэтому для процесса сжатия в реакторе значение показателя адиабаты существенно зависит от коэффициента остаточных газов, регулируя который можно изменять максимальную температуру процесса.

Производительность ГСГ пропорциональна давлению наддува реактора и частоте циклов и обратно пропорциональна коэффициенту остаточных газов и температуре на входе в реактор. Частота циклов определяется собственной

частотой автоколебаний поршня, которая пропорциональна корню квадратному из действующих на поршень газовых сил в мертвых точках и обратно пропорциональна корню квадратному из хода и массы поршня.

Состав синтез – газа (% об.) при работе на метане и коэффициенте избытка воздуха близком к стехиометрии ( $\alpha = 0,25$ ):  $H_2$  -  $38 \div 40,6$ ,  $CO$  –  $18,5 \div 19,6$ ,  $N_2$  -  $39 \div 40$ ,  $CH_4$  - не более 0,8,  $H_2O$  - не более 0,9,  $CO_2$  - не более 0,1. Сажа отсутствует.  $H_2/CO = 1,92 \div 2,15$ . В заданных пределах состав корректировался подачей воды,  $CO_2$  при  $\alpha = 0,208 \div 0,259$  (по воздуху). Коэффициент остаточных газов в реакторе  $> 0,66$ .

Температура продуктов реакции в конце расширения в зависимости от содержания воды,  $CO_2$  и кислорода может быть на  $60 - 100^\circ$  ниже или выше, чем в начале сжатия.

Подача воды позволяет корректировать состав синтез – газа при условии, что максимальная температура цикла выше 2400 К. В противном случае пары воды уменьшают показатель адиабаты и температуру, т.е. переохлаждают реактор и увеличивают долю не прореагировавших компонент. Добавки воды существенно уменьшают температуру в конце цикла по сравнению с первоначальной, что потребует дополнительного подогрева смеси перед реактором или увеличения  $\alpha$ .

С точки зрения упрощения нагрева исходной смеси практический интерес представляют варианты с увеличением температуры на выходе по сравнению с температурой начала сжатия. Тогда при достаточном температурном напоре можно сбалансировать теплоподвод к исходной смеси с теплоотводом от синтез – газа.

Увеличение давления наддува приводит к увеличению производительности реактора, но уменьшает степень сжатия, температуру цикла и увеличивает долю не прореагировавшего метана.

Уменьшение содержания кислорода и увеличение количества воды приводит к снижению максимальной температуры цикла и увеличению доли метана. Содержанием воды и кислорода можно корректировать температуру на выходе из реактора и полезную работу, которая может быть, как положительной, так и отрицательной. Следовательно, за счет содержания воды и кислорода можно поддерживать оптимальные параметры в реакторе.

Процесс парциального окисления в СПГКСГ попутного нефтяного газа состава (% об.): метан - 53, этан – 16,7, пропан – 12,4, азот – 5,3,  $CO_2$  - 0,8, более тяжелые углеводороды – 11,8 характеризуется следующими показателями процесса: степень сжатия  $> 40$  (у дизеля с КШМ меньше 17), коэффициент остаточных газов в реакторе  $> 0,67$ , коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 0,265$ , соответствует стехиометрии для газа данного состава. Состав синтез - газа после СПГКСГ (% об.):  $H_2$  – 36,6,  $CO$  – 20,5,  $CH_4$  - 0,32,  $CO_2$  - 0,2,  $N_2$  – 41,04, вода – 1,4.

По сравнению с метаном производительность падает на  $1/3$ , что является следствием снижения показателя адиабаты смеси и более ранним воспламенением. Для исключения этих нежелательных последствий следует снизить температуру в начале сжатия и увеличить  $\alpha$ . Отношение  $H_2/CO =$

1,7839 для последующего синтеза может быть недостаточным, поэтому часть синтез – газа придется разделять, например, на мембране с утилизацией горючего остатка в двигателе СПГКСГ.

Проведены исследования возможности риформинга газа, полученного пиролизом твердых углеводородов. Состав исходного газа (% об.):  $H_2$  – 28,  $CO$  – 17,  $CH_4$  – 32,  $CO_2$  – 20, пр. 3. Состав газа после СПГКСГ: водород – 56,1,  $CO$  – 40,6,  $CH_4$  – 2,63,  $CO_2$  – 0,1, пр.0,69.

СПГКСГ пригоден для производства синтез – газа из пиролизного газа. Однако для этого требуется повышенная температура на входе в реактор и большая доля остаточного газа, что снижает производительность. Для повышения производительности рационально вместо остаточного газа добавлять аргон, который будет циркулировать в системе.

Экспериментальные исследования проводились на СПГКСГ ПСГ28, внешний вид которого представлен на рис.2.



Рис. 2.

На основе расчетно-экспериментальных исследований разработана рабочая документация на СПГКСГ ПСГ260 и определены условия масштабирования. Ниже приводятся характеристики СПГКСГ при условии комплектации их серийными дизельными или компрессорными кольцами.

### Характеристики несимметричных СПГКСГ

- диаметр цилиндра реактора, мм	260	318	360	520
- масштабный коэффициент	1	1,223,	1,385,	2
- высота, мм	2200	2709	3067	4430
- максимальный диаметр корпуса	702	807	914	1320
- масса, кг	1357	2483	3600	10856
- расход метана, нм <sup>3</sup> /час	492	748	960	2000
- выход синтез – газа, нм <sup>3</sup> /час	2400	3650	4685	9760.

### Характеристики симметричных СПД

- тип СПД	1МП120	П320,
- диаметр цилиндра реактора, мм	120	320,
- длина, мм	1254,	3600,
- ширина, мм	573,	1200,
- высота, мм	524	1500,
- масса, кг	420	2500 (5000),

### В режиме СПГКСГ

- расход метана, нм <sup>3</sup> /час	92	1047,
- выход синтез – газа, нм <sup>3</sup> /час	449	5109,

### В режиме СПДК

- мощность, кВт	100	1000,
-----------------	-----	-------

### В режиме КЭУ

- мощность, кВт	400	5000,
- эффективный КПД, %	50 – 54	52 – 58.

Представленные результаты позволяют сравнить СПГКСГ с традиционной технологией. При расходе метана на технологию 4700 нм<sup>3</sup>/час масса трубчатой печи с парогенератором и компрессором синтез – газа (сжатие с 1 до 50 бар) составляет 253 т. Расход метана на обеспечение технологии 38 – 45 % от основного технологического потока.

В случае СПГКС потребуется 10 ПСГ260 плюс один резервный, общей массой 14,93 т., при расходе метана на обеспечение технологии 4 – 6 %.

В установке «Энергосинтоп-10000» в качестве ГСГ используется тепловозный дизель Д49 (16ЧН 26/26), который по данным производителя (ОАО «Коломенский тепловозостроительный завод») без вспомогательных



систем и электрогенератора весит 16 тонн и рассчитан на производительность по метану (суммарную, т.к.  $\alpha > 0,38$ ) 2070  $\text{нм}^3/\text{час}$ . Эквивалентное количество ПСГ260 = 4, при массе 5,43 т, что даже без учета компрессора синтез газа в 3 раза меньше. Увеличение  $\alpha$  до 0,3 позволяет повысить производительность ПСГ260 в 1,5 – 1,7 раза и соответственно уменьшить массу и стоимость (ПСГ260 представляет более простую и технологичную машиностроительную продукцию, чем двигатель Д49).

Не менее важное значение в газохимической технологии имеет надежность машинных комплексов. Устранение избыточных звеньев повышает ресурс СПД и исключает аварии, описанные А.Самойловым [ 21 ], т.к. отсутствуют ломающиеся коленчатые валы и крейцкопфы. Модульность СПГКСГ также способствует повышению надежности, т.к. выход из строя одного цилиндра не приводит к остановке всей технологической цепочки, как в случае с 16-ти цилиндровым дизелем. Наличие резервного модуля позволяет без остановки производства и снижения мощности производить обслуживание, ремонт и замену СПГКСГ.

В существующих сегодня в мире технологиях первая стадия (производство синтез - газа) процесса получения жидких целевых продуктов является наиболее сложной, энергоемкой и дорогой (50–60% от стоимости всего производства). Представленные результаты указывают на возможность существенного снижения нижнего (по производительности) порога рентабельности, а малая масса и модульность позволяет организовать непосредственно в месте добычи высокорентабельное производство с комплексной утилизацией всего углеводородного сырья с помощью мобильных модулей полной заводской готовности.

Производительность СПГКСГ существенно возрастает, если вместо воздуха применяется кислород. Эффективность такого пути повышения производительности для газохимии не очевидна. В металлургии синтез – газ с содержанием  $\text{H}_2 > 60 \%$  и  $\text{CO} > 30 \%$  может оказаться эффективным заменителем кокса.

#### Выводы.

1. Свободнопоршневые генераторы компримированного синтез - газа удовлетворяют технологическим требованиям.
2. Генератор может работать на смесях широкого состава.
3. Компактность и автономность генераторов синтез - газа позволяет наращивать производительность путём установки дополнительных модулей.
4. Химико-технологическая часть установки ориентирована на энерго и ресурсосбережение. По сравнению с ближайшим конкурентом (дизелем) производственные, транспортные, энергетические и эксплуатационные затраты снижаются в 3 - 8 раз.

*Литература*

1. Импульсное сжатие газов в химии и технологии / Ю.А.Колбановский, В.С.Щипачев, Н.Я.Черняк и др. - М.: Наука, 1982.- 240 с.
2. Кобозев Н.И., Казарновский Я.С., Менделевич И.И. Взрывная конверсия метана – Труды ГИАП, 1957, т. VII, с.155-166.
3. Взрывная конверсия метана / Казарновский Я.С., Деревянко И.Г., Стежинский А.И. и др. – Труды ГИАП, 1957, т. VIII, с.89-105.
4. Взрывная конверсия метана / Казарновский Я.С., Кобозев Н.И., Стежинский А.И. и др. – Труды ГИАП, 1957, т. VIII, с.106-123.
5. Батенин В.М., Толчинский Л.С. Модульные установки для производства синтетических жидких топлив с использованием химических реакторов сжатия.- М.: ИВТ РАН, 2004, с.
6. Патент РФ №2096313.
7. Патент РФ №2129462.
8. Патент РФ №2136580.
9. Патент РФ №2196761.
- 10.Б.К.Нефедов и др. Каталитические процессы переработки природного и попутного нефтяных газов в автомобильные топлива. //Катализ в промышленности, 2003, №3, стр.10-21.
11. Glouchenkov Maxim, Kronberg Alexander. New developments of free piston machines for chemical industry and energy conversion systems.-EnConTech B.V., Enschede.
12. Патент РФ №2097121.
13. Патент РФ №2115467.
14. Патент РФ №2142844.
15. Измерение температур стенок цилиндра свободнопоршневых машин / Максимук Б.Я., Джигирей Т.С., Игнатъев Е.Б. и др. – В кн. Использование природного газа в промышленности. – Киев: Наук. думка, 1969, с. 221-227.
16. Васильев В.Д., Соложенцев Е.Д. Кибернетические методы при создании поршневых машин.- М.: Машиностроение. 1978.- 120 с.
17. Патент РФ №2325224.
18. Жуков В.П., Сеченов В.А., Стариковский А.Ю. Самовоспламенение метановоздушных смесей в широком диапазоне давлений. – Физика горения и взрыва, 2003, т.39, № 5, с. 3 – 12.
19. Жуков В.П., Сеченов В.А., Стариковский А.Ю. Самовоспламенение бедной смеси пропан/воздух при высоких давлениях. – Кинетика и катализ, 2005, т.46, № 3, с. 344 – 353.
20. Природный газ в двигателях / Кудряш А.П., Пашков В.В., Маринин В.С. и др. – Киев: Наук. думка, 1990.- 200 с.
21. Самойлов А. Осторожно! Безответственный поставщик! – Газохимия, 2008, № 1, с. 62 – 64.