

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-46-59

Буланин В.А.

ООО «Инновационные технологии – Энергетика»

E-mail: v_bulanin@mail.ru

ВЫБОР ТИПА ГАЗОПОРШНЕВЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ТЕПЛО- И ГАЗОСНАБЖЕНИЯ В РОССИИ

Аннотация. В различных отраслях экономики, в том числе в системах централизованного теплоснабжения городов и поселений используются преимущественно паротурбинные и газотурбинные тепловые электростанции, работа которых основана на когенерации – преобразовании химической энергии топлива в электрическую и тепловую энергию. При этом значительную часть источников теплоснабжения все еще представляют отопительные котельные, потребляющие при этом электроэнергию на собственные нужды. В газовой отрасли в качестве привода газоперекачивающих установок используются дизельные двигатели. Одним из факторов, сдерживающих организацию комбинированного производства электрической и тепловой энергии на отопительных котельных, является отсутствие производства в России газопоршневых электростанций мощностью более 500 кВт. Применение импортного оборудования для этих целей, как правило, экономически и технологически не оправдано. Согласно приказу Минпромторга России от 16.04.2019 № 1327 долю импорта газопоршневых и газотурбинных установок предусмотрено сократить с 70 % в 1918 г. до 25 % в 2024 г. Обосновано одно из перспективных направлений создания в России газопоршневых установок – воспроизводство на современной технологической базе двухтактных двигателей, производимых в СССР газопоршневых двигателей серии ГД100 до настоящего времени работающих на ряде объектов. Правительством России рассматривается вопрос перевода на газомоторное топливо магистральных и маневровых тепловозов железнодорожного транспорта. Показано одно из направлений повышения к.п.д. двухтактных двигателей – внутрицилиндровое смешение газа с воздухом с форкамерно-факельным искровым зажиганием.

Ключевые слова: газопоршневой двигатель, когенерация, двухтактный, форкамера, искровое зажигание, утилизация теплоты.

Введение. Теплоснабжение является одной из важных подотраслей жилищно-коммунального хозяйства России. Основой централизованного теплоснабжения является комбинированная выработка электрической и тепловой энергии, которая предусматривает (обеспечивает) повышение эффективности коммунальных систем теплоснабжения малых городов России путем сооружения теплоэлектроцентралей (ТЭЦ) с газотурбинными и газопоршневыми установками [1]. Однако одной из серьезных проблем в России является отсутствие собственного производства газопоршневых двигателей и электростанций на их основе мощностью выше 0,5 МВт для малой теплоэнергетики (и не только для этого).

За 28 лет после распада СССР не были приняты реальные шаги к решению важной государственной задачи – организация производства газопоршневых двигателей и электростанций на их основе. Надежды государства на ее решение действующими в России двигателестроительными предприятиями не оправдались, в связи с чем, например, для модернизации отопительной котельной в теплоэлектростанцию (ТЭЦ) газопоршневые двигатели и электростанции приходится приобретать за рубежом (таблица 1 [2]).

Пунктом 5 «Плана мероприятий...» (шифр отраслевого плана 05ЭМ5) (Приказ Минпромторга России от 16.04.2019 № 1327) предусмотрено производство газопоршневых установок с двигателями с искровым зажиганием со снижением в 2024 г. доли их импорта до 25 %. Для того чтобы добиться этого показателя необходимо предпринять реальные шаги по созданию в короткие сроки соответствующего производства в России, например, в Белгородской области. Этой задаче соответствует, например, создание газопоршневых электростанций с двигателями единичной средней мощностью 500 - 2000 кВт, которые нужны, в первую очередь, для «обеспечения приоритетного использования комбинированной выработки электрической и тепловой энергии для теплоснабжения» (ст. 3 ФЗ «О теплоснабжении»).

«Энергетической стратегией ОАО «РЖД» на период до 2010 года и на перспективу до 2030 года», например, предусмотрено развитие собственной генерации для нужд стационарной энергетики железных дорог на основе газопоршневых электростанций мощностью 1 - 5 МВт. Газопоршневые двигатели применяются и в качестве привода компрессоров на газоперекачивающих станциях.

Таблица 1

Основные зарубежные производители газопоршневых двигателей и электростанций

№ п/п	Страна	Компания	Диапазон мощностей (cosφ = 1,0), кВт
1	США	Caterpillar Inc (включая приобретенные FG Wilson, MWM GmbH, Perkins)	70-6720
2		Cummins Inc	20-2000
3		Waukesha Engine Dresser Inc	65-3480
4	Германия	MAN Diesel & Turbo SE	47-18900
6		MTU Onsite Energy GmbH (Tognum Group)	120-2145
7	Австрия	GE Energy Jenbacher gas engines	300-9500
8	Япония	Mitsubishi Heavy Industries Ltd.	305-5750
9	Великобритания	Rolls Royce Power Engineering Plc (Power Generation)	1190-8550
10	Финляндия	Wartsila Finland Oy	4000-19000
11	Словакия	Elteco a.s. (двигатели - Lombardini, Perkins, Volvo Penta, Iveco, MTU)	6,9-2700
12	Чехия	TEDOM s.r.o.	7-3800
13	Испания	Guascor S.A.	140-1204

В связи с этим задача организации создания таких двигателей является весьма актуальной как для теплоэнергетики, так и для других отраслей экономики России, например, для судовых энергетических установок и тепловозной тяги ОАО «РЖД». <...> Однако на текущий момент чисто газопоршневые двигатели для магистральных тепловозов отечественной промышленностью пока не созданы. Нет разнообразия газопоршневых двигателей и для имеющихся различных модификаций маневровых тепловозов, выпускаемых промышленностью. Сроки создания и освоения производства таких тепловозных двигателей могут составить более 5 лет.... <...> [3].

Газопоршневый двигатель – это двигатель внутреннего сгорания с системой образования топливно-воздушной смеси и искровым зажиганием. В качестве топлива использует природный газ и другие виды газового топлива, что обеспечивает экономичность, высокий ресурс работы и минимальный уровень шума.

Для решения поставленной задачи целесообразно обратиться к недавнему прошлому опыту СССР, согласно которому:

1. Были разработаны, произведены и продолжают до настоящего времени работать в большом количестве двухтактные дизели серии Д100, подтверждая достаточную их надёжность, например:

– 7Д100 – стационарные электростанции на объектах Минобороны РФ;

– 3Д100; 13Д100; 14Д100 - судовые дизельные двигатели;
 – 11ГД100 – стационарная газопоршневая электростанция;
 – 15Д100 – стационарные электростанции на АЭС;
 – 17ГД100 – стационарная газодизельная электростанция;
 – 10Д100М – более 5000 ед. в качестве тепловозной тяги в системе ОАО «РЖД». В общей сложности с 1958 по 2007 годы было построено 19 000 секций тепловозов ТЭ10 всех модификаций преимущественно с дизельными двигателями 10Д100 и 10Д100М.

2. По заказу Мингазпрома СССР на основе тепловозного дизель-генератора 2Д100 был разработан и изготовлен в количестве более 170 единиц газовый мотор-генератор 11ГД100М мощностью 1000 кВт до настоящего времени работающих на магистральных газопроводах Бухара-Урал, Средняя Азия-Центр.

Дизели серии Д100 (рис. 1) были созданы в СССР на Харьковском заводе транспортного машиностроения (ХЗТМ), ныне – Завод им. В.А. Малышева, по копии судового двухтактного оппозитного (со встречно движущимися поршнями) дизеля 38D8 $\frac{1}{8}$ " фирмы «Фербенкс-Морзе» (Fairbanks-Morse, США) (рис. 2), снятого с одного из поставленных по ленд-лизу военных катеров.

Основные расчетные характеристики гильзы цилиндра дизеля 10Д100 представлены в таблице 2.

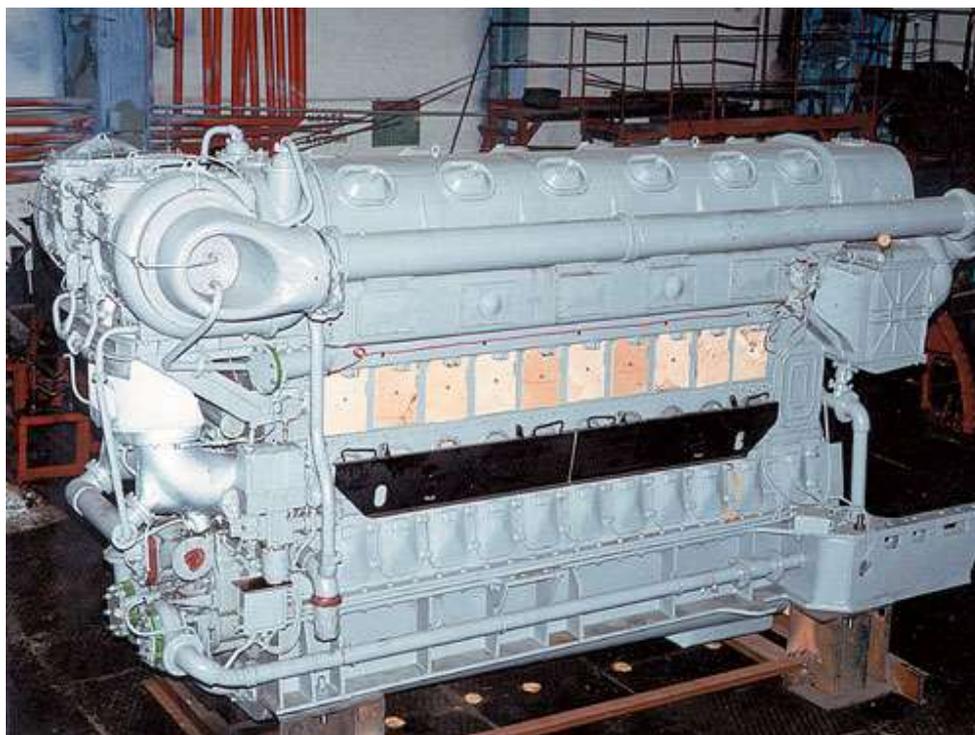
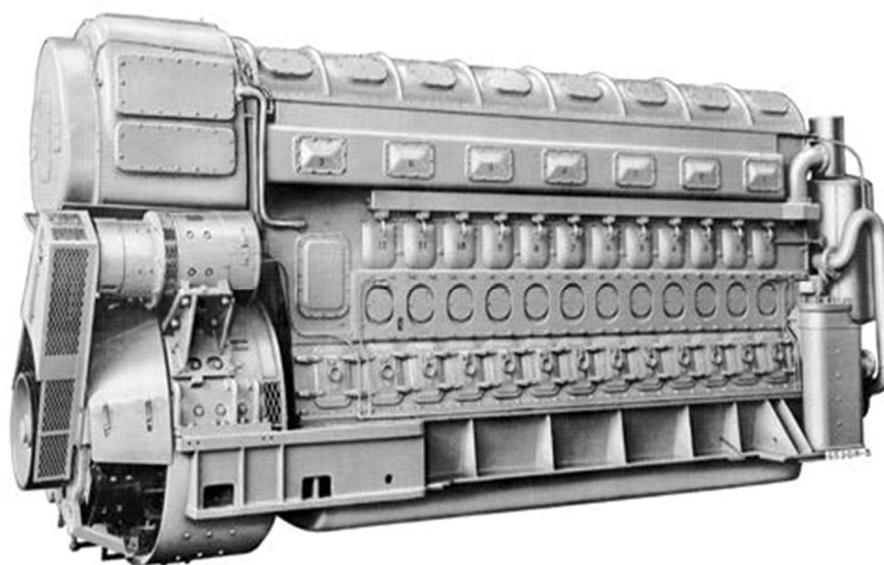


Рис. 1. Тепловозный дизель типа 10Д100М



Область применения в США дизелей типа 38D8 $\frac{1}{8}$ ":

- Атомные электростанции
- Водохозяйственные сооружения
- Морские суда
- Компрессоры природного газа
- Насосные станции
- Больничные учреждения
- Муниципалитеты
- Производство электроэнергии

Рис. 2. Дизель 38D8 $\frac{1}{8}$ " 12-ти цилиндровый с воздухоудкой

Таблица 2

Основные характеристики гильзы цилиндра дизеля 10Д100

Объем цилиндра (при перекрытии окон впуска и выпуска), л	14
Количество цилиндров в дизеле, шт.	10
Степень сжатия	14,7
Внутренний диаметр цилиндра, мм	207
Ход оппозитно расположенных поршней, мм	2 x 254

С учетом вышеуказанного опыта выполненных в СССР работ можно путем конвертации, например, тепловозного дизеля 10Д100М мощностью 2200 кВт изготовить газопоршневой двигатель мощностью 2000 кВт (850 об/мин, к.п.д. 40 %) без турбонаддува, так как для сгорания газа требуется меньший в 1,5–2,0 раза избыток воздуха, чем при работе на дизельном топливе. Возможно создание ряда модификаций газового двигателя ГД100 в зависимости от частоты вращения вала и числа цилиндров в нем:

Число цилиндров	Мощность двигателя (кВт) при частоте вращения (об/мин)	
	850	1000
10	2000	2300
6	1200	1400

Одно из прогрессивных направлений в конструкции создаваемых газопоршневых двигателей – форкамерно-факельное зажигание газозооной смеси в камере сгорания цилиндра двигателя, обеспечивающее повышение надежности и эффективности его работы, а также сокращение вредных выбросов с отработавшими газами в окружающую среду [4–6].

1. Технологические особенности газопоршневой установки на основе двухтактного тепловозного дизеля Д100.

Как было отмечено выше, согласно статье 3 ФЗ «О теплоснабжении» одним из общих принципов организации отношений в сфере теплоснабжения является «обеспечение приоритетного использования комбинированной выработки электрической и тепловой энергии для организации теплоснабжения». Комбинированная выработка электрической и тепловой энергии – режим работы ТЭЦ, при котором производство электрической энергии непосредственно связано с одновременным производством тепловой энергии. В связи с отсутствием паровых и газовых турбин мощностью до 2 МВт на ТЭЦ в небольших поселениях и на промышленных предприятиях целесообразно применять газопоршневые двигатели соответствующей мощности.

Газопоршневые двигатели могут быть как четырехтактными, так и двухтактными. По сравнению с четырехтактными двухтактные газопоршневые двигатели оказались более эффективными, так как они, например, за один оборот совершают в 1,5–2,0 раза большую мощность. В связи с этим автор делает акцент на двигателях такого типа.

В плане решения задачи производства газопоршневых двигателей целесообразно использовать положительный опыт СССР в создании газовых двигателей 11ГД100 на базе дизелей

2Д100. Воспроизводство газопоршневых двигателей (и электростанций на их основе) целесообразно организовать по аналогии (путем конвертации, но на современной технологической основе) с работающими в ОАО «РЖД» двухтактными дизелями серии 10Д100М. Для технического обслуживания дизелей серии Д100 на территории России существует сеть производственных мощностей по их техническому обслуживанию и изготовлению запасных частей и узлов к ним. Таким образом, в целях обеспечения энергетической и экономической безопасности страны, целесообразно возобновление производства газового мотор-генератора 11ГД100М (и / или создание его отечественных аналогов) путем конвертации дизеля 10Д100М на современной технологической основе с использованием ранее приобретенного опыта.

1.1. Особенности конструкции газового двигателя 11ГД100.

В 1908 г. главный инженер Коломенского завода Р.А. Корейво изобрел и построил оригинальный горизонтальный одноцилиндровый двухтактный дизель с расходящимися поршнями. В 1911 г. его выставили на Международной выставке двигателей в Петербурге. Там же депонировался и опытный дизель подобной конструкции Юнкерса (Германия). Имеются данные, что немецкий конструктор использовал некоторые особенности двигателя Корейво, но без какого-либо упоминания о нем. Позже дизели с расходящимися (противоположно движущимися) поршнями нашли широкое применение в авиации (бомбардировщики Ю-87). Изготовителем таких дизелей являлась и крупная американская фирма «Фербенкс Морзе» (рис. 2). В СССР это – известный дизель серии Д100 [7].

Создание и внедрение двигателей серии Д100 было осуществлено на базе большого комплекса научно-исследовательских, опытных, конструкторских и проектных работ на экспериментальной одноцилиндровой установке ГД100. В 1957–1960 гг. эти исследования велись в лаборатории двигателей Академии наук СССР.

Большая часть работ проводилась совместно ВНИИгазом (г.Москва) и заводом им. Малышева (г.Харьков).

Основные научно-исследовательские работы проводились во ВНИИгазе на экспериментальной одноцилиндровой установке, изготовленной заводом им. Малышева: исследования по отработке рабочего процесса, по системам питания, пуска и зажигания газовых двигателей ГД100. Полученные на основе этих работ рекомендации проверялись на заводских опытных двигателях.

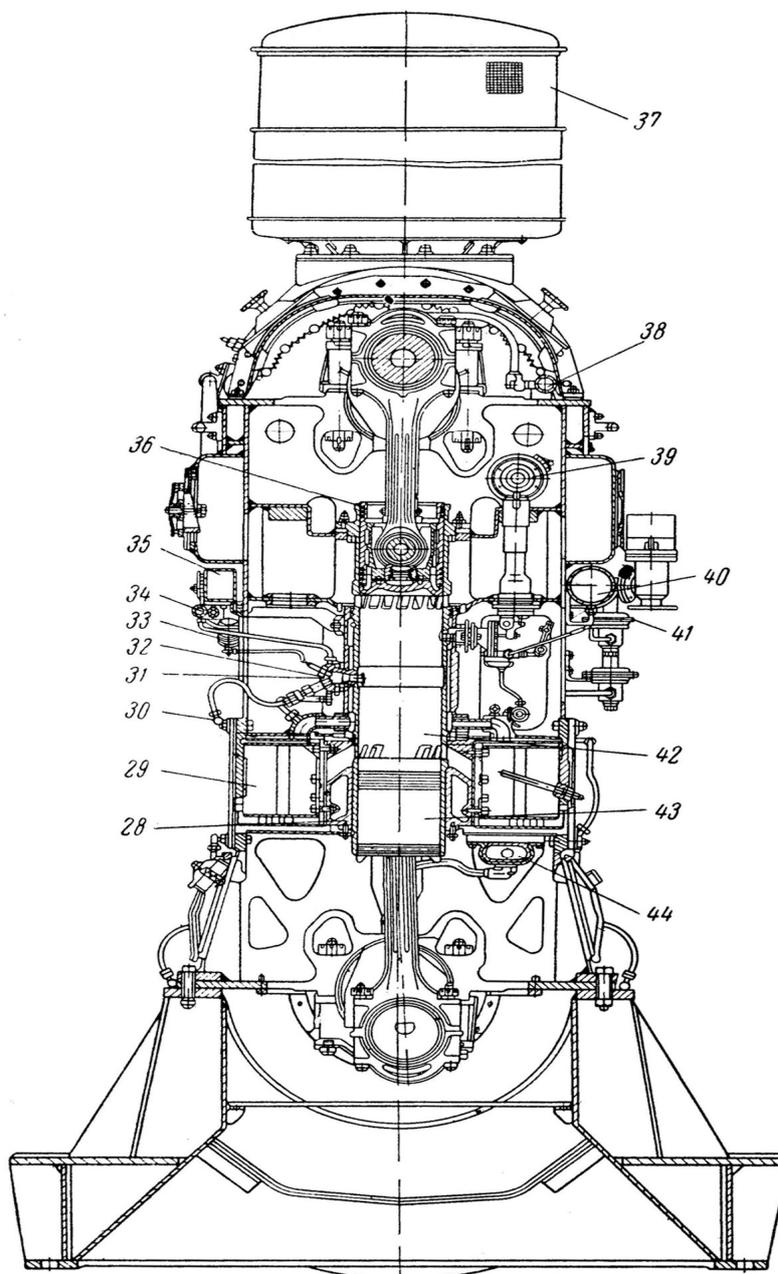


Рис. 3.а Газовый двигатель 1ГД100. Поперечный разрез [6]

(Двигатель рядный, двухтактный со встречно движущимися поршнями, форкамерно-факельным зажиганием с внутренним смесеобразованием).

28 – выхлопная коробка; 29 – выхлопной коллектор;

30 – коллектор форкамерного газа; 31 – форкамера с автоматическим клапаном; 32 – свеча зажигания;

33 – катушка зажигания; 34 – коллектор отвода воды от форкамер; 35 – коллектор отвода воды из

цилиндров; 36 – верхний поршень; 37 – глушитель шума; 38 – верхний масляный коллектор;

39 – кулачковый вал; 40 – коллектор цилиндрического газа; 41 – пусковой редуктор; 42 – цилиндр;

43 – нижний поршень; 44 – нижний масляный коллектор

Значительное число мотор-генераторов 1ГД100М до настоящего времени находятся в эксплуатации, что свидетельствует об их достаточной надежности и экономичности.

В газовых двигателях ГД100 осуществлен высокоэффективный рабочий процесс с форкамерно-факельным зажиганием, высокой степенью сжатия при обедненных и сверхобедненных топливовоздушных смесях.

Система подачи газа у газовых двигателей серии ГД100 включает в себя газовые клапаны с дозатором и по одной форкамере с автоматическим клапаном на каждом цилиндре, автоматические диафрагменные редукторы с пневматическими командными головками форкамерного и пускового газа, а также пусковой газовый клапан с пневматической командной головкой.

Эксплуатация подтвердила значительные преимущества газовых двигателей ГД100 перед дизелями Д100, на базе которых они строятся, в отношении износостойкости, долговечности, срока службы и расхода масла. Резкое уменьшение износов основных деталей и практическое отсутствие нагара позволило вдвое увеличить сроки службы между техническими осмотрами и ремонтами, а сроки службы масла увеличить в 3–4 раза. Все это указывает на целесообразность применения газовых двигателей ГД100 не только в газовой промышленности, но и в других отраслях экономики Российской Федерации, в первую очередь в системах теплоснабжения.



Рис. 3.б. Табличка мотор-генератора 11ГД100 М

Все производители создают газопоршневые установки на основе дизельных двигателей. В частности, в 1960-ые годы по заказу Мингазпрома СССР ВНИИГАЗ на основе тепловозного рядного оппозитного (со встречно движущимися поршнями) 10-ти цилиндрового дизеля 2Д100 разработал газопоршневую установку типа 11ГД100 [6, рис. 107] (см. рис. 3. а), а с 1963 г. Харьковский завод им. В.А. Малышева начал выпуск газовых мотор-генераторов 11ГД100М рис. 3.б), оснащенных двухтактными газовыми двигателями мощностью 1500 л.с. при частоте вращения 750 об/мин.

В книге [6] достаточно подробно описаны результаты этих исследований, устройство и характеристики газовых двигателей ГД100 и агрегатов на их базе, а также данные эксплуатации мотор-генераторов 11ГД100М на газопроводе Бухара–Урал. Приведены особенности конструкции и технического обслуживания этих двигателей. Особое внимание было уделено форкамерно-факельному зажиганию газозвушной смеси в камере сгорания двигателя.

1.2. Форкамерно-факельное искровое зажигание. ЛАГ-процесс.

Доктор технических наук Л.А. Гуссак (Институт химической физики АН СССР) открыл явление высокой химической активности продук-

тов неполного сгорания, образующихся при горении смеси углеводородов с воздухом богатого состава, в которой для полного сгорания не хватает приблизительно 50 % кислорода. Это явление по имени автора получило название ЛАГ-процесс.

Госкомитет Совета Министров СССР по делам изобретений и открытий внес это открытие в Государственный реестр открытий СССР (Приоритет открытия – октябрь 1952 г. Диплом № 142. Заявка № ОТ-8628): «Л.А. ГУССАК. «Явление высокой химической активности продуктов не полного сгорания богатой углеводородной смеси. Формула открытия. Установлено неизвестное ранее явление высокой химической активности продуктов неполного сгорания, обусловленное образованием сверхравновесной концентрации химически активных частиц (свободных атомов и радикалов) при сгорании богатой углеводородной смеси».

Как было обнаружено, при горении предельно богатой горючей смеси, кроме стабильных продуктов неполного сгорания, образуется значительная, на 2–4 порядка выше равновесной, концентрация химически весьма активных свободных атомов (H) и радикалов (CH₃ и др.), несмотря на значительное (на 400–800 °K) снижение температуры. Такие химически активные частицы, обладающие высокой скоростью турбулентной диффузии, инициируют быстрые, почти сплошь разветвленные химические реакции, и тем самым обеспечивают резкое сокращение периода задержки воспламенения рабочей смеси.

На этой основе разработаны новый принцип процесса лавинной активации горения и способ форкамерно-факельного инициирования и стабилизации горения, применение которых в камерах сгорания двигателей, в силовых и тепловых устройствах значительно повышает их технико-экономические показатели.

Подробное описание ЛАГ-процесса дано в статье Л.А. Гуссака [10] (рис. 4). Теория ЛАГ-процесса и его применение в двигателях внутреннего сгорания защищены авторскими свидетельствами СССР, советскими патентами в США, Англии, Франции, Италии, ФРГ, Японии и других странах.

Искровой разряд воспламеняет богатую ($\alpha_{\text{ф}} = 0,4–0,7$) топливную смесь в форкамере (объем которой составляет 2–3 % объема камеры сгорания). Проходя через узкие перепускные каналы, фронт пламени гаснет. В камере сгорания поток продуктов сгорания, содержащий активные атомы и радикалы, становится завихренным. При этом образуются многочисленные турбулизированные очаги горения. Они воспламеняют рабочую газозвушную смесь ($\alpha_{\text{к}} = 0,91–2,00$) в камере сгорания. Цифрами (рис. 4) обозначена

последовательность распространения фронта пламени в форкамере и зон горения в камере сгорания.

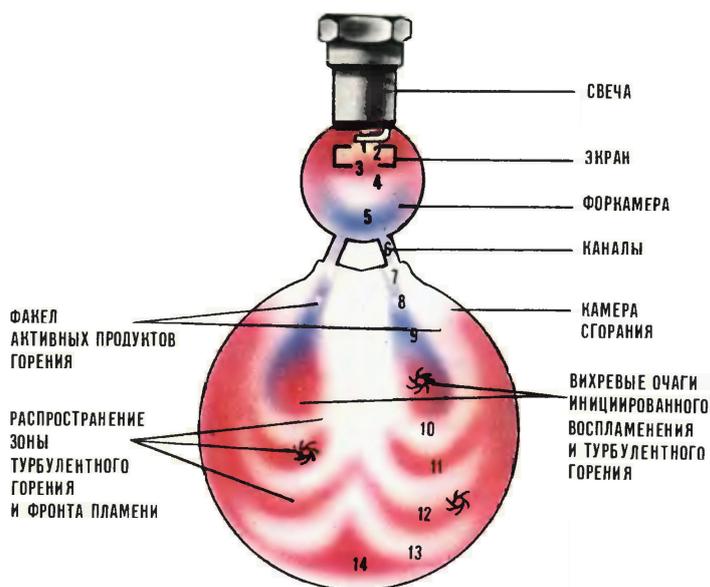


Рис. 4. Схема процесса лавинной активации горений (ЛАГ-процесса) в форкамерном двигателе [8]

2. Пути создания газопоршневой установки на базе двухтактного дизеля.

2.1. Этапы создания модифицированной газопоршневой установки.

Создание газопоршневой установки на основе тепловозного однорядного оппозитного (со встречно движущимися поршнями) двухтактного дизеля 10Д100 и его модификаций следует начать с выполнения соответствующего инвестиционного проекта. Инвестиционный проект предусматривает выполнение научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ (НИОКР и ТР) в три этапа:

1. Изучение конструкции и способа работы дизелей серии Д100 и газовых двигателей ГД100 на их основе с разработкой основных технических решений, обеспечивающих возможность конвертации дизеля 10Д100 в газопоршневую установку мощностью 1100–2000 кВт.

2. Создание стенда на основе базового образца однорядного оппозитного среднеоборотного дизеля типа 10Д100, проведение исследований по усовершенствованию системы управления подачей и воспламенения топлива (природного газа) с последующей, на основании полученных результатов, модернизацией дизеля в газопоршневую установку, проведением режимно-наладочных и балансовых опытов и комплексных испытаний с нагрузками 1100–2000 кВт.

3. Выполнение технологических работ с постановкой на производство газопоршневой установки мощностью 1100-2000 кВт на основе дизеля 10Д100М и его модификаций.

Основное внимание автора при выполнении НИОКР было уделено способам подвода природного газа в цилиндр и его смесеобразованию с воздухом, а также оптимизации форкамерно-факельной системы зажигания смеси газ-воздух в камере сгорания.

На рис. 5 показана схема работы гильзы цилиндра дизеля 10Д100. Дизтопливо в камеру сгорания подается через напротив расположенные в центре гильзы цилиндра две форсунки, после сжатия воздуха (при сближении поршней в зоне камеры сгорания), что обеспечивает оптимальные условия для перемешивания топлива с воздухом, его воспламенения и горения.

В газовом двигателе 11ГД100М (рис. 6), наоборот, природный газ подается через одно верхнее сопловое отверстие в момент перекрытия поршнями впускных и выпускных окон. Наддув воздуха – одноступенчатый.

2.2. Цель и задачи научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Тема НИОКР: Создание стенда на основе базового образца однорядного оппозитного среднеоборотного газопоршневого двигателя 0ГД100 на основе дизеля типа 10Д100, проведение исследований по усовершенствованию системы управления подачей и воспламенения при-

родного газа с последующей, на основании полученных результатов, модернизацией дизеля 10Д100М в газопоршневую установку, проведением режимно-наладочных и балансовых опытов и комплексных испытаний с нагрузками 1100-2000 кВт.

2.2.1. Первый этап выполнения НИОКР

Цель 1-го этапа НИОКР: изучение конструкции и способа работы дизелей серии Д100 и газовых двигателей ГД100 на их основе с разработкой основных технических решений, обеспечивающих возможность конвертации дизеля 10Д100 в газопоршневую установку мощностью 1100-2000 кВт.

Задачи исследований на 1-ом этапе НИОКР:

- изучение конструкции и анализ результатов конвертации тепловозного дизеля 2Д100 в газовый двигатель 11ГД100 [6];
- изучение результатов исследования по отработке рабочего процесса, по системам питания, пуска и зажигания газовых двигателей ГД100; проработка систем внутреннего смесеобразования газа с воздухом и зажигания смеси для конвертации дизеля 10Д100 в газопоршневую уста-

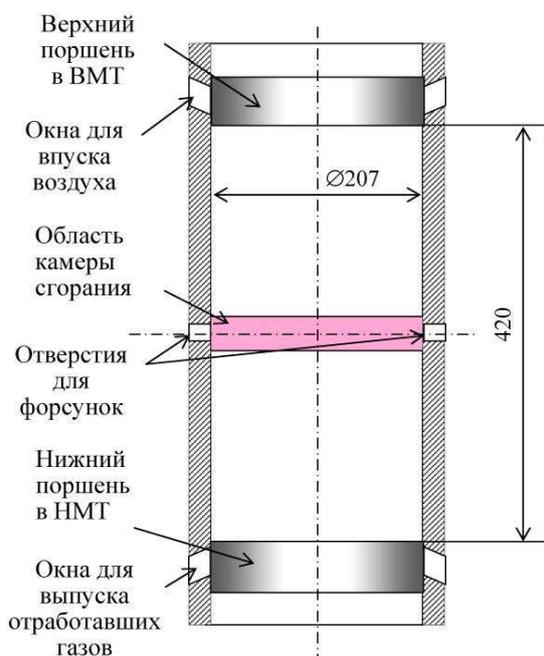


Рис. 5. Основные характеристики гильзы цилиндра дизеля 10Д100

Результаты выполненного 1-го этапа НИОКР показали, что на основе тепловозного двигателя 10Д100М мощностью 2200 кВт может быть создана газопоршневая установка (без турбонаддува) мощностью до 2000 кВт. Особое внимание при выполнении НИОКР было уделено особенностям конструкции и условий работы системы форкамерно-факельного зажигания смеси

новку мощностью 1100-2000 кВт; изучение особенностей форкамерно-факельного зажигания и анализ опыта его применения в двигателях внутреннего сгорания;

- проведение патентных исследований по газопоршневым двигателям с форкамерно-факельным зажиганием топливно-воздушной смеси.

Результаты выполненного первого этапа НИОКР.

1-ый этап НИОКР был выполнен по собственной инициативе за счет собственных средств ООО «ИТ-Энергетика». С учетом проведенной работы и, в частности, рекомендаций [6], были приняты следующие основные технические решения по созданию газопоршневого двигателя на основе дизеля 10Д100:

- в связи с тем, что при работе на газе требуется меньший избыток воздуха, чем на дизтопливе, турбонаддув в двигателе не предусмотрен;
- для оптимизации режима сгорания природного газа последний подается в цилиндр через встречно расположенные по центру гильзы сопловые отверстия (рис. 6). Для повышения мощности двигателя до 1600–2000 кВт необходимо соответственно увеличить расход газа без увеличения расхода воздуха в камеру сгорания.

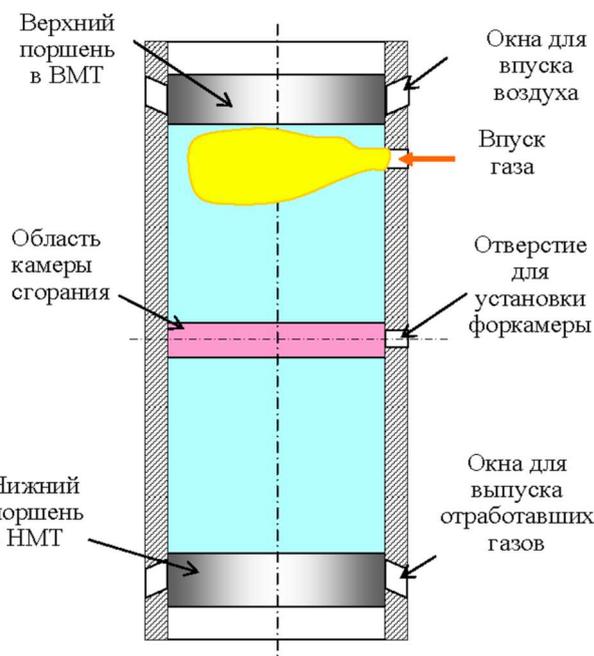
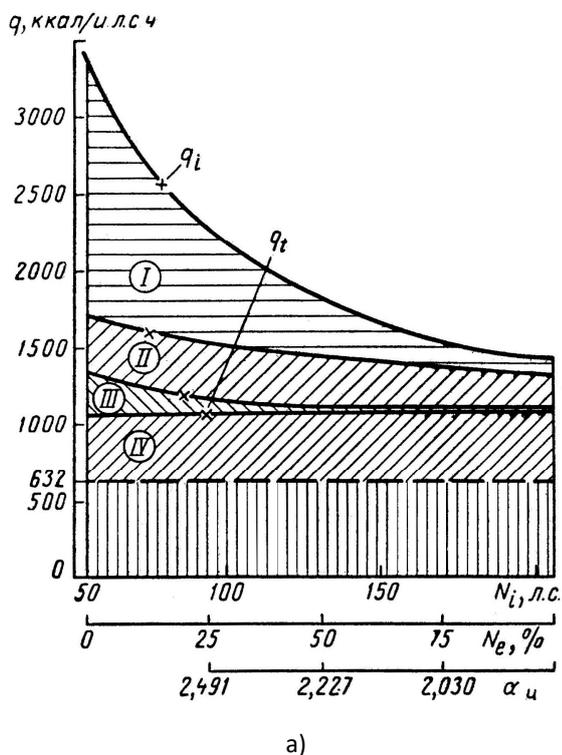


Рис. 6. Схема впуска газа в гильзу цилиндра 11ГД100 (ВНИИГАЗ)

газ-воздух с учетом проведенных ВНИИГАЗ исследований [6].

Так как базовая технология перевода двигателя Д100 для работы на газе была разработана более 50 лет назад и, естественно, не учитывает многих достижений современной науки и техники, при доработке отдельных узлов и систем

двигателя 10Д100М и отладке на специализированном стенде в режиме газового двигателя могут быть достигнуты, в сравнении с двигателем 11ГД100М, более высокие показатели, как по мощности, сроку службы, так и по к.п.д.



Было установлено, что двигатели 11ГД100 при прочих положительных качествах имеют и недостаток – пониженный к.п.д. преимущественно за счет недогорания природного газа в цилиндрах (рис. 7, I).

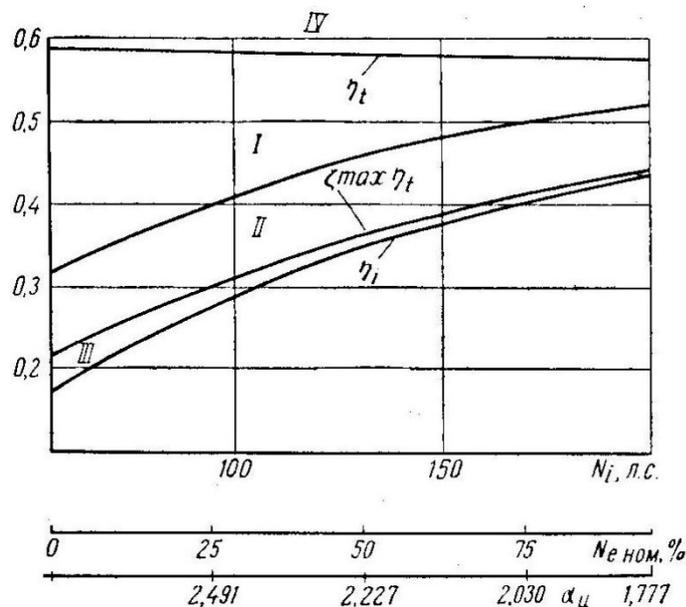


Рис. 7. Энергетические характеристики газопоршневого двигателя 11ГД100 [5]

а) внутренний тепловой баланс газового двигателя 11ГД100 [6, рис. 85];

б) к.п.д. и потери рабочего процесса в газовом двигателе 11ГД100 [6, рис. 86].

I – потери вследствие недогорания; II – потери вследствие теплопередачи при сгорании;

III – потери вследствие несвоевременности выделения тепла; IV – термодинамические (неустраняемые) потери

Основными причинами больших значений недогорания природного газа в двигателе 11ГД100 при пониженных нагрузках являются:

- большие избытки воздуха в цилиндре ($\alpha_{ц} > 1,8$);
- односторонний (в верхнюю часть цилиндра) впуск порции природного газа (рис. 6), вследствие чего не обеспечиваются оптимальные условия для его перемешивания с воздухом при сжатии перед сгоранием;
- недостаточность одной форкамеры для повышения эффективности сгорания газа.

По результатам проведенных НИР ООО «ИТ – Энергетика» предложило альтернативный вариант для устранения этого недостатка – двухсторонний впуск газа по центру гильзы цилиндра через форкамеры (рис. 8), обеспечивающий более эффективное смешение газа с меньшим избытком воздуха и, как следствие, более полное его сгорание. Все газообразное топливо проходит через форкамеру, а в цилиндр поступает чистый

воздух. Небольшая часть топлива остается в форкамере, большая часть перетекает в цилиндр. [6; 8; 9].

При избытке воздуха $\alpha_{ц} = 1,777$ [6] достигается мощность в одном цилиндре 200 л.с. (147 кВт), для десяти цилиндров – 1470 кВт, что подтверждает принципиальную возможность увеличения мощности мотор-генератора до 2000 кВт, например, за счет уменьшения избытка воздуха ниже $\alpha_{ц} = 1,777$ и повышения частоты вращения вала с 750 до 1000 об/мин. Данные расчеты требуют экспериментальной проверки и подтверждения.

На основании выполненных расчетов и анализа особенностей процесса горения метана в цилиндре двигателя при мощности 1600-2000 кВт на клеммах генератора достигается к.п.д. более 40 %. Такие показатели подтверждаются результатами испытаний, проведенными ВНИИГАЗом на одноцилиндровом отсеке ОГД100 на режиме двигателя 11ГД100 [6].

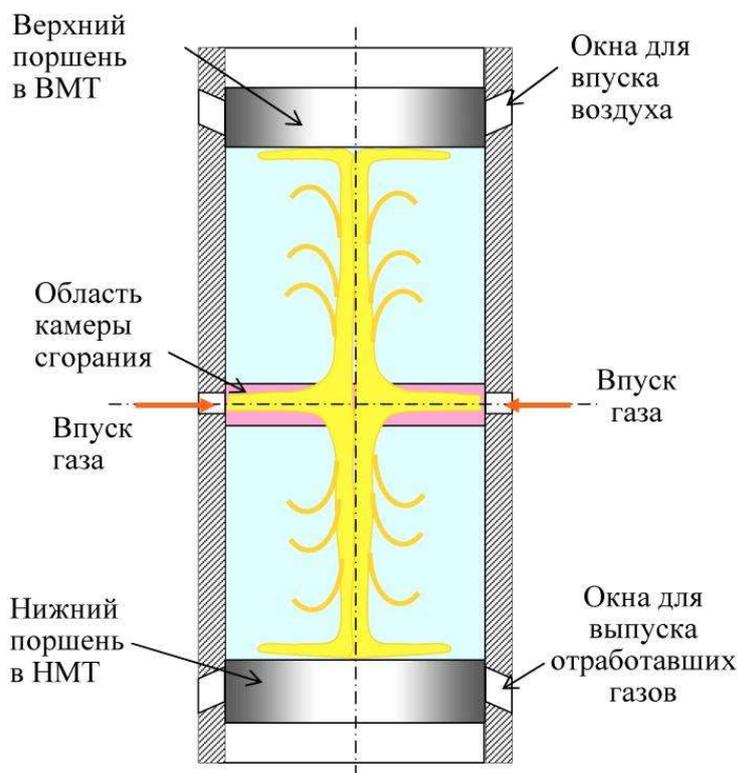


Рис. 8. Вариант подачи газа в гильзу цилиндра

Ведущие специалисты ООО «Инновационные технологии – Энергетика» с участием и под руководством автора с 2005 года занимаясь данной тематикой, в частности, обеспечили строительство «под ключ» на «Валуйском комбинате растительных масел» (Белгородская обл.) электростанции с газопоршневыми установками 11ГД100, конвертированными из дизельных двигателей 7Д100М, ранее созданных по заказу Минобороны СССР (рис. 9).

С 2013 года работы по созданию модернизированной газопоршневой установки 11ГД100 были возобновлены, но уже на основе тепловозных дизелей 10Д100, в частности, в 2014 году по собственной инициативе и за счет собственных средств был выполнен 1-ый этап НИОКР: «Изучение конструкции и способа работы дизелей серии Д100 и газовых двигателей ГД100 на их основе с разработкой основных технических решений, обеспечивающих возможность конвертации дизеля 10Д100 (рис. 2) в газопоршневую установку мощностью 1100-2000 кВт».

Целесообразно использовать этот опыт (объединив его научный и производственный потенциал с АО «ВНИИЖТ», ООО «ЛокоТех-Промсервис», БГТУ им. В.Г. Шухова) и на его основе, например, тепловозный дизель 10Д100М конвертировать в газопоршневые двигатели ГД100 мощностью 1000 - 2000 кВт, предварительно выполнив научно-исследовательские, опытно-кон-

структорские и технологические работы на одноцилиндровом газопоршневом отсеке ОГД100 и на 10-ти цилиндровом двигателе ГД100.

2.2.2. Второй этап выполнения НИОКР.

Цель: Создание действующего образца газопоршневой установки мощностью 1100-2000 кВт на основе дизеля 10Д100 с проведение исследований и экспериментальных испытаний.

Проведение второго этапа НИОКР целесообразно выполнить в период 2020–2021 гг.

Задачи исследований на 2-ом этапе НИОКР:

1. Разработка опытно-конструкторской и технической документации для изготовления и монтажа систем подачи газа в цилиндры, форкамер газопоршневой установки, создаваемой на основе дизеля 10Д100 с разработкой модели внутреннего смесеобразования газа с воздухом и процесса сгорания топлива при различной степени наддува воздуха.

2. Приобретение одноцилиндрового отсека ОД100 и проведения на нём экспериментальных проверок полученных результатов и корректировки по полученным результатам ранее разработанной документации.

3. Создание стенда десятицилиндрового газового двигателя мощностью 1100 – 2000 кВт для проведения экспериментальных исследований целесообразно, например, на одном из крупнейших промышленных предприятий городского округа Белгород: ООО «Белэнергомаш-БЗЭМ».



Рис. 9. Газопоршневой мотор-генератор 11ГД100 мощностью 1000 кВт, конвертированный из дизель-генератора 7Д100М

4. Проведение комплексных экспериментальных исследований газового двигателя мощностью 1100 – 2000 кВт полученных результатов и корректировки ранее разработанной документации по полученным результатам.

5. Разработка программы и технического задания для постановки на производство газопоршневой установки мощностью 1100-2000 кВт на основе дизеля 10Д100 и его модификаций. Газопоршневая электростанция ГД100 мощностью 1000 – 2000 кВт будет создана с соблюдением требований ГОСТ 15.101–98, ГОСТ Р 55006-2012, ГОСТ Р 55007-2012, ГОСТ Р 15.301-2016, ГОСТ 15.016-2016.

2.2.3. План создания газопоршневой установки мощностью 1100–2000 кВт.

Как было показано в работе [3] сроки создания и освоения производства, например, газопоршневых тепловозных двигателей могут составить более 5 лет.

Для включения в реестр инвестиционных проектов последние должны соответствовать «Правилам и критериям отбора инвестиционных

проектов» утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 30.12.2015 № 1516 (ред. от 16.08.2018).

Инвестиционный проект «Создание газопоршневой установки мощностью 1100–2000 кВт на основе двухтактного рядного оппозитного (со встречно движущимися поршнями) среднеоборотного тепловозного дизеля типа 10Д100 (10Д20,7/2х25,4) мощностью 2200 кВт (750, 850, 1000 об/мин)» должен соответствовать критериям установленным пунктом 5 «Правил предоставления субсидий из федерального бюджета...», утвержденных постановлением Правительства РФ от 12.12.2019 № 1649.

Предложенная концепция производства газопоршневых двигателей получила поддержку ведущих организаций, например, входящих в структуру ОАО «РЖД», в том числе ООО «ЛокоТех-Промсервис» и АО «ВНИИЖТ».

Выводы. Основой централизованного теплоснабжения поселений является комбинированное производство электрической и тепловой энергии не только на паротурбинных и газотурбинных, но и на газопоршневых электростанциях

мощностью до 25 МВт с газопоршневыми установками единичной мощностью более 500 кВт. Однако в России, как для электростанций, так и для компрессорных установок в системах газоснабжения, применяются дизельные и газопоршневые двигатели зарубежных производителей, что отрицательно влияет на экономику страны.

Газопоршневые двигатели и электростанции на их основе требуются не только для источников теплоснабжения, но и для нефтегазовой отрасли, ОАО «РЖД», так и для других отраслей экономики России. Определена одна из важнейших задач – создание производства в России газопоршневых двигателей и электростанций на их основе, например, в Белгородской области с учетом имеющегося накопленного опыта.

Исследования показали перспективность применения для этих целей двухтактных, в том числе оппозитных (со встречно движущимися поршнями) газопоршневых установок.

Показаны пути выхода из создавшейся ситуации с воспроизводством газопоршневых двигателей серии ГД100 с форкамерно-факельным зажиганием газозооной смеси в камере сгорания цилиндра двигателя на современной технологической основе [4; 5] с учетом опыта производства до распада СССР и эксплуатации газопоршневых электростанций 11ГД100М, созданных на базе тепловозных дизелей 2Д100 [6]. При этом для целей теплоснабжения может использоваться теплота отработавших в двигателях газов с температурой до 400°С.

Исследования конструктивных характеристик, режимов работы и опыта эксплуатации двигателя 11ГД100М выявили перспективные возможности его усовершенствования, которые позволят повысить экономичность и экологичность его работы.

Показано, что предложенные направления разработки газопоршневых двигателей работы соответствуют Плану мероприятий по импортозамещению (Приказ Минпромторга России от 16.04.2019 № 1327).

Исследования предложено продолжить и довести до постановки на производство газопоршневых двигателей мощностью 1100-2000 кВт в Белгородской области с участием, например, ООО «Инновационные технологии – Энергетика», БГТУ им. В.Г. Шухова и ООО «Белэнергомаш – БЗЭМ».

Информация об авторах

Буланин Владимир Анатольевич, кандидат технических наук, Генеральный директор ООО «Инновационные технологии – Энергетика». E-mail: v_bulanin@mail.ru. Россия, 308007, г Белгород, ул. Мичурина, 56.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Николаев Ю.Е., Дубинин А.Б., Вдовенко И.А. Повышение эффективности коммунальных систем теплоснабжения малых городов России путем сооружения ТЭЦ с газотурбинными и газопоршневыми установками // *Новости теплоснабжения*. 2013. №11 (159). С. 6–8.
2. Алексахина Л.И., Курочкин Д.С., Михеев Д.В., Шабалин И.С. Анализ российского рынка когенерационных технологий на базе газопоршневых установок // *Транспортное дело России*. 2013. №6 (109). Ч. 2. С. 197–201.
3. Колесников В.И., Мартынюк И.В. О научных разработках в области применения газовых систем для тяговых двигателей на железнодорожном транспорте // *Бюллетень Объединенного Ученого Совета ОАО «РЖД»*. 2017. № 5-6. С. 1–5.
4. Slefarski R., Gołebiewski M., Czyzewski P., Grzymisławski P., Wawrzyniak J. Wawrzyniak. Analysis of combustion process in industrial gas engine with prechamber-based ignition system. *Open Access Journal «Energies»*. Basel, Switzerland. 2018. 11. 336 p.
5. Ashish Shah. Improving the efficiency of gas engines using pre-chamber. Ignition doctoral thesis (electronic version: <https://pdfs.semanticscholar.org/dac7/c482893ba3049f15f87bf1f2d8df73415894.pdf>). Division of combustion engines department of energy sciences. Sweden, December 2015. 74 p.
6. Генкин К.И., Аксенов Д.Т., Струнге Б.Н. Газовые двигатели ГД100 и агрегаты на их базе // *Л., Недра*, 1970. 328 с.
7. Балабин В.Н. На путях созидания (к 100-летию коломенских дизелей) // «*Локомотив*». Ежемесячный массовый производственный журнал. 2003. № 4 (556). С. 42–47.
8. Морозов К.А. О некоторых особенностях регулирования состава смеси в форкамере двухтактного газового двигателя. *Труды Института двигателей АН СССР*, 1962. Вып. 6, С. 5–17.
9. Соболев Л.М. Основы смесеобразования в двигателях форкамерно-факельным зажиганием. *Костромской сельскохозяйственный институт*. Выпуск 14, 1967. 257 с.
10. Гуссак Л.А. Полуостров взрывного горения // *Химия и жизнь*. 1974. № 6. С. 33–40.

Поступила в декабре 2019 г.

©Буланин В.А., 2020

Bulanin V.A.

LLC «Innovative technologies – Energy»

E-mail: v_bulanin@mail.ru

CHOOSING THE TYPE OF GAS PISTON INSTALLATIONS FOR HEAT AND GAS SUPPLY IN RUSSIA

Abstract. In various sectors of the economy, including district heating systems in cities and settlements, steam turbine and gas turbine thermal power plants are mainly used. Their operation is based on cogeneration, which is the conversion of chemical fuel energy into electrical and thermal energy. At the same time, a significant part of the heat supply sources are still represented by heating boilers, which consume electricity for their own needs. In the gas industry, diesel engines are used as the drive for gas pumping plants. One of the factors hindering the organization of combined production of electric and thermal energy in heating boilers is the lack of production in Russia of gas-piston power plants with a capacity of more than 500 kW. The use of imported equipment for these purposes is usually not economically and technologically justified. According to the order of the Ministry of Industry and Trade of Russia dated 16.04.2019 No. 1327, the share of imports of gas piston and gas turbine units is planned to be reduced from 70 % in 1918 to 25 % in 2024. One of the promising directions of creating gas piston installations in Russia is justified: reproduction on a modern technological basis of two-stroke engines produced in the USSR of GD100 series gas piston engines that are still working at a number of facilities. The Russian government is considering converting mainline and shunting locomotives of railway transport to gas-powered fuel. One of the ways of increasing the efficiency of two-stroke engines is shown-in-cylinder mixing of gas with air with pre-chamber-flare spark ignition.

Keywords: gas piston engine, cogeneration, two-stroke, pre-chamber, spark ignition, heat recovery.

REFERENCES

1. Nikolaev Yu.E., Dubinin A.B., Vdovenko I.A. Improving the efficiency of municipal heat supply systems in small cities of Russia by building a thermal power plant with gas turbine and gas piston installations [Povyshenie effektivnosti kommunal'nyh sistem teplosnabzheniya malyh gorodov Rossii putem sooruzheniya TEC s gazoturbinnyimi i gazoporshnevnyimi ustanovkami]. Heat supply news. 2013. No. 11 (159). Pp. 6–8. (rus)
2. Aleksahina L.I., Kurochkin D.S., Miheev D.V., SHabalin I.S. Analysis of the Russian market of cogeneration technologies based on gas-piston installations [Analiz rossijskogo rynka kogeneracionnyh tekhnologij na baze gazoporshnevnyh ustanovok]. Transport business of Russia. 2013. No. 6 (109). Part 2. Pp. 197–201. (rus)
3. Kolesnikov V.I., Martynyuk I.V. About scientific developments in the field of application of gas systems for traction engines on railway transport [O nauchnykh razrabotkakh v oblasti primeneniya gazovykh sistem dlya tyagovykh dvigateley na zheleznodorozhnom transporte]. Bulletin of the joint Scientific Council of Open society «RZHD». 2017. No. 5-6. Pp. 1–15. (rus)
4. Slefarski R., Gołebiewski M., Czyzewski P., Grzymisławski P., Wawrzyniak J. Analysis of combustion process in industrial gas engine with pre-chamber-based ignition system. Open Access Journal «Energies». Basel, Switzerland. 2018. 11. 336 p.
5. Ashish Shah. Improving the efficiency of gas engines using pre-chamber. Ignition doctoral thesis (electronic version: <https://pdfs.semanticscholar.org/dac7/c482893ba3049f15f87bf1f2d8df73415894.pdf>). Division of combustion engines department of energy sciences. Sweden, December 2015. 74 p.
6. Genkin K.I., Aksenov D.T., Strunge B.N. GD100 Gas engines and units based on them [Gazovye dvigateli GD100 i agregaty na ih baze]. L., Nedra, 1970. 328 p. (rus)
7. Balabin V.N. On the ways of creation (to the 100th anniversary of Kolomna diesels) [Na putyah sozidaniya (k 100-letiyu kolomenskih dizelej)]. «Locomotive». Monthly mass production magazine, No. 4 (556), 2003. Pp. 42-47. (rus)
8. Morozov K.A. On some features of the mixture composition regulation in the two-stroke gas engine pre-chamber. Proceedings of the Institute of engines of the USSR Academy of Sciences [O nekotoryh osobennostyah regulirovaniya sostava smesi v forkamere dvuhtaktnogo gazovogo dvigatelya]. Vol. 6, 1962. (rus)
9. Sobolev L.M.. Fundamentals of mixture formation in engines with pre-chamber-flare ignition. Kostromskoj sel'skohozyajstvennyj institut. Vypusk 14 [Osnovy smeseobrazovaniya v dvigatelyah forkamerno-fakel'nyh zazhiganiem]. 1967. 257 p. (rus)
10. Gussak L.A. Peninsula of explosive combustion [Poluostrov vzryvnogo goreniya. Zhurnal «Himiya i zhizn'»]. Chemistry and life. 1974. No. 6. Pp.33-40. (rus)

Information about the authors

Bulanin, Vladimir. A. PhD, General Director LLC «Innovative technologies – Energy». E-mail: v_bulanin@mail.ru. Russia, 308007, Belgorod, st. Michurina, 56.

Received in Desember 2019

Для цитирования:

Буланин В.А. Выбор типа газопоршневых установок для тепло- и газоснабжения в России // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 3. С. 46–59. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-46-59

For citation:

Bulanin V.A. Choosing the type of gas piston installations for heat and gas supply in Russia. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 3. Pp. 46–59. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-46-59