

УДК 629.7.036.54-63

**СОВРЕМЕННЫЕ ЖИДКОСТНЫЕ РАКЕТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ
АО «НПО ЭНЕРГОМАШ ИМЕНИ АКАДЕМИКА В.П. ГЛУШКО».
СОСТОЯНИЕ ПРОГРАММ И ПЕРСПЕКТИВЫ
(к 110-летию со дня рождения академика В.П. Глушко)**

© 2018 г. Чванов В.К., Судаков В.С., Лёвочкин П.С.

Акционерное общество «НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко»
(НПО Энергомаш)
Ул. Бурденко, 1, г. Химки, Московская обл., Российская Федерация, 141400,
e-mail: energo@npoem.ru

Рассмотрено состояние программ по разработке мощных жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) АО «НПО Энергомаш». НПО Энергомаш ведет свою историю с мая 1929 г., когда под руководством В.П. Глушко было создано подразделение в структуре Газодинамической лаборатории в Ленинграде по разработке ракетных двигателей и ракет. Академик В.П. Глушко многие годы был руководителем этого предприятия, он является основоположником отечественного жидкостного ракетного двигателестроения, выдающимся ученым и конструктором, одним из пионеров ракетно-космической техники, генеральным конструктором системы «Энергия–Буран». Именно для сверхтяжелой ракеты-носителя «Энергия» были разработаны самые мощные в мире ЖРД РД-170, которые стали основой для создания в НПО Энергомаш большого семейства кислородно-керосиновых ЖРД. Представлены краткие результаты выполнения программ разработки и последующей эксплуатации семейства кислородно-керосиновых ЖРД с дожиганием окислительного генераторного газа, созданного на базе ЖРД РД-170/171, разработанных для ракет-носителей «Энергия» и «Зенит». Приведены основные характеристики двигателей РД-170/171, РД-180, РД-191 и РД-181. Рассказано о поставленных задачах по разработке двигателя РД-171МВ для РН «Союз-5» и перспективах дальнейшей эксплуатации и модернизации семейства кислородно-керосиновых ЖРД АО «НПО Энергомаш».

Ключевые слова: жидкостные ракетные двигатели, НПО Энергомаш, академик В.П. Глушко, разработка ракетных двигателей.

**MODERN LIQUID-PROPELLANT ROCKET ENGINES
MADE BY NPO ENERGO MASH NAMED AFTER
ACADEMICIAN V.P. GLUSHKO.
CURRENT STATUS OF PROGRAMS AND FUTURE PROSPECTS
(to mark the 110th anniversary of academician V.P. Glushko)**

Chvanov V.K., Sudakov V.S., Levochkin P.S.

*Joint Stock Company «NPO Energomash» (NPO Energomash)
1 Burdenko str., Khimki, Moscow region, 141400, Russian Federation, e-mail: energo@npoem.ru*

The paper reviews the current status of development programs for high-power Liquid-Propellant Rocket Engines (LPRE) at NPO Energomash. The history of NPO Energomash goes back to May 1929, when under the direction of V.P. Glushko a division was set up within the Gasdynamics Lab in Leningrad to develop rocket engines and rockets. For many years academician V.P. Glushko was the head of this company, he is the farther

of our country's liquid rocket propulsion engineering, outstanding scientist and designer, one of pioneers of rocket and space technology, general designer of Energia–Buran system. It was for the superheavy launch vehicle Energia that the world's most powerful LPRE RD-170 were developed and became the basis for developing at NPO Energomash a large family of oxygen-kerosene LPRE. The paper presents a summary of the results of the program to develop and subsequently operate a family of oxygen-kerosene LPRE with afterburning of the oxidizing generator gas designed on the basis of LPRE RD-170/171 originally developed for launch vehicles Energia and Zenit. The paper provides key performance data for engines RD-170/171, RD-180, RD-191 and RD-181. It discusses the new challenge of developing the engine RD-171MV for launch vehicle Soyuz-5 and future prospects for further operation and upgrading of the family of oxygen-kerosene LPRE of NPO Energomash.

Key words: liquid-propellant rocket engines, NPO Energomash, academician V.P. Glushko, development of rocket engines.



ЧВАНОВ В.К.



СУДАКОВ В.С.



ЛЁВОЧКИН П.С.

ЧВАНОВ Владимир Константинович — доктор технических наук, советник генерального директора НПО Энергомаш, e-mail: chvanov_vk@npoem.ru
CHVANOV Vladimir Konstantinovich — Doctor of Science (Engineering), Adviser to the General Director of NPO Energomash, e-mail: chvanov_vk@npoem.ru

СУДАКОВ Владимир Сергеевич — главный специалист НПО Энергомаш, e-mail: sudakov_vs@npoem.ru
SUDAKOV Vladimir Sergeevich — Chief Specialist at NPO Energomash, e-mail: sudakov_vs@npoem.ru

ЛЁВОЧКИН Пётр Сергеевич — кандидат технических наук, заместитель генерального директора — главный конструктор НПО Энергомаш, e-mail: levochkin_ps@npoem.ru
LEVOSHKIN Petr Sergeevich — Candidate of Science (Engineering), Deputy General Director — General Designer of NPO Energomash, e-mail: levochkin_ps@npoem.ru

Введение

АО «НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко» — ведущее предприятие России и мира в области разработки мощных жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) для космических ракет-носителей (РН) [1]. НПО Энергомаш — головное предприятие интегрированной структуры, объединившей ведущие российские предприятия ракетного двигателестроения. В состав структуры включены: ПАО «Протон-ПМ» — изготовитель двигателей РД-275М для РН тяжелого класса «Протон-М» и АО «Конструкторское бюро химавтоматики» —

разработчик и изготовитель двигателей для верхних ступеней РН «Союз» и «Ангара». Практически все космические объекты СССР и России были выведены на орбиты с использованием двигателей разработки НПО Энергомаш [1–3].

Современные ЖРД РД-171М, РД-180, РД-191 и РД-181 относятся к семейству кислородно-керосиновых ЖРД с дожиганием окислительного газа, созданному на базе ЖРД РД-170/171.

Глушко Валентин Петрович (2 сентября 1908 г. — 10 января 1989 г.) — один из пионеров ракетно-космической техники, выдающийся ученый и конструктор,

основоположник советского жидкостного ракетного двигателестроения, главный конструктор ГДЛ-ОКБ (КБ Энергомаш) (1929–1974 гг.), генеральный конструктор НПО «Энергия» (1974–1989 гг.). Член ЦК КПСС (1976–1989 гг.). Член-корреспондент АН СССР (1953 гг.), академик АН СССР (1958 г.). Дважды Герой Социалистического Труда (1956, 1961 гг.), лауреат Ленинской премии (1957 г.), дважды лауреат Государственной премии СССР (1967, 1984 гг.). Кавалер пяти орденов Ленина, орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени, Золотой медали К.Э. Циолковского АН СССР, почетный гражданин городов Казани, Калуги, Ленинска, Одессы, Приморска, Химок, Элисты.

Под его руководством были созданы первые отечественные ЖРД семейства ОРМ, разработаны первые мощные ЖРД для баллистических ракет, двигатели для прославленного семейства ракет Р-7, РН «Протон», «Циклон», «Космос», самые мощные в мире ЖРД РД-170/171 для РН «Энергия» и «Зенит»: всего под его руководством разработаны и сданы в эксплуатацию двигатели для 19 боевых и 15 космических ракет. Многогранная космическая система «Энергия – Буран» стала апофеозом деятельности выдающегося конструктора ракетно-космической техники академика В.П. Глушко. По словам академика Ю.П. Семенова «...Валентин Петрович Глушко был наш великий соотечественник, великий ученый, великий гражданин нашей страны. У него было одно беспокойство, чтобы наша страна была мощной, и чтобы создаваемые им изделия превосходили все аналогичное, что создавалось за рубежом. О его активной деятельности можно сказать, что без Валентина Петровича не было бы ни того двигателя, который вынес на орбиту мощную ракету «Энергия», аналогов которой и сейчас нет во всем мире, ни самой «Энергии»...».

Магистральным направлением школы академика В.П. Глушко в создании ЖРД было максимально полное использование химической энергии топлива, т.е. получение максимального удельного импульса при обеспечении высокой надежности двигателей.

Удельный импульс является той величиной, которую конструктор хочет получить максимальной, выбирая основные параметры двигателя, схемные решения и компоненты топлива. Величина удельного импульса ракетного двигателя при

выбранном топливе зависит, прежде всего, от полноты сгорания топлива и степени расширения продуктов сгорания в сопле двигателя [1].

Так как для маршевых двигателей первых ступеней ракет, работающих с уровня земной поверхности, давление на срезе сопла выбирается близким к атмосферному, то практически удельный импульс зависит от давления в камере сгорания (КС).

Освоение высокого давления в КС ЖРД потребовало решения целого ряда проблем, как конструкторских, так и технологических, а также материаловедческих.

В ЖРД-строении применяются две основные принципиальные схемы организации процессов гидродинамики и горения.

Первая из них — это так называемая открытая. Здесь основная часть топлива из насосов идет сразу в КС, а небольшая часть используется для привода турбины, после чего сбрасывается в окружающую среду, создавая гораздо меньший удельный импульс, чем основная часть топлива. Рост давления в КС открытой схемы ограничен ввиду увеличения затрат топлива на привод турбины и, вследствие этого, роста потерь удельного импульса двигателя.

Возможность повышения давления и связанный с этим рост удельного импульса тяги предоставляет второй вариант схемного решения организации процессов в двигателе — использование так называемой замкнутой или закрытой схемы. Суть ее состоит в том, что оба компонента топлива полностью сгорают только в КС при оптимальном их соотношении. При этом один из компонентов, например окислитель, полностью после насоса направляется в специальный газогенератор, куда подается также небольшая доля горючего. В газогенераторе топливо сгорает при большом избытке окислителя для обеспечения температуры газа, приемлемой для надежной работы турбины. Этот окислительный газ после турбины поступает в КС, куда также поступает горючее, которое сначала проходит тракт охлаждения КС.

Замкнутая схема может быть выполнена и в варианте, когда один из компонентов топлива полностью газифицируется, а затем поступает на турбину.

В замкнутых схемах отсутствует выброс части топлива с низким удельным импульсом, как в открытой схеме, поэтому при ее использовании нет потерь удельного импульса, и эти схемы позволяют

поднимать давление в КС до величин, при которых обеспечивается энергетическая увязка параметров, когда мощность турбины равна суммарной мощности насосов окислителя и горючего, и обеспечивается прочность элементов подачи компонентов топлива.

Первый ЖРД, выполненный по схеме дожигания генераторного газа, — 11Д33 для разгонного блока Л ракеты-носителя 8К78, был создан в 1960 г. РКК «Энергия» имени С.П. Королёва [4]. Разгонный блок 8К78 обеспечил запуски 283 космических объектов.

Замкнутые схемы, в основном с избытком окислителя, при использовании высококипящих компонентов, таких как жидкий кислород с керосином, получили широкое развитие в отечественном двигателестроении [2, 5]. Причем параметры, которые достигнуты в отечественных двигателях по давлению и удельному импульсу, даже в тех двигателях, которые были разработаны в середине 1960-х и в 1970-х гг., остаются высокосовременными даже с точки зрения сегодняшних достижений в ЖРД.

Наиболее выдающимся представителем таких двигателей является двигатель РД-170, который был разработан для использования на первой ступени РН «Энергия» [3, 6]. Это самый мощный в мире ЖРД. Он имеет тягу 740 тс у поверхности Земли и 806 тс — в пустоте. В четырех камерах двигателя в секунду сгорает 2,4 т топлива: жидкий кислород с керосином при давлении 250 кгс/см². При этом мощность турбонасосного агрегата составляет 180 МВт, что равно мощности силовых установок трех ледоколов «Сибирь».

В этом двигателе, как в фокусе, сконцентрированы достижения многих наук и решены проблемы, которые открывают путь интенсивного развития двигателей следующих поколений, о состоянии программ которых рассказывается в этой статье.

ЖРД РД-170 и РД-171 для РН «Энергия» и «Зенит»

ЖРД РД-170/171 были разработаны в 1976–87 гг. для РН «Энергия» и «Зенит», соответственно [6, 7]. Их разработка стала качественно новым шагом в создании ЖРД. Самый мощный в мире четырехкамерный ЖРД обладает наивысшим уровнем параметров и характеристик для двигателей данного класса, работает на жидком кислороде и керосине. РД-170 (рис. 1) для РН «Энергия» предназначен для многократного использования: он был сертифицирован на четырехкратное использование в 1990 г. и на десятикратное — в 1992 г. Следует отметить, что десятикратное использование предполагало также дополнительно проведение двух контрольно-технологических испытаний и пятикратный гарантийный запас. В таблице приведены основные параметры РД-170 и РД-171 как ЖРД с топливом кислород–керосин (РГ-1) и дожиганием окислительного газа.

Три экземпляра двигателя прошли без переборки по 17 огневых испытаний с номинальным временем работы, а один из них прошел дополнительно восемь укороченных огневых испытаний с общим количеством включений 25. Двигатель характеризуется высокой надежностью функционирования, ремонтно- и контролепригодностью и имеет большой запас по ресурсу (не менее пяти к моменту полетного использования).

Основные параметры двигателей семейства РД-170 и РД-171

Модификации двигателя	РД-170	РД-171	РД-171М
Тяга, земная/пустотная, тс	740 / 806,4	740 / 806,4	740 / 806,4
Удельный импульс, земной/пустотный, м/с	3 033,1 / 3 304,6	3 033,1 / 3 304,6	3 033,1 / 3 304,6
Давление в камере сгорания, кгс/см ²	250	250	250
Масса, сухая/залитая (в состоянии поставки*), кг	10 045/11845	10 595/11 595	10 295/11 295
Габариты, высота/диаметр, мм	4 000/3 800	4 150/3 565	4 150/3 565
Период разработки	1976–86 гг.	1976–88 гг.	1992–96 гг. 2003–2004 гг.
Назначение	РН «Энергия»	РН «Зенит»	РН «Зенит 3SL»
Количество и период пусков	2 пуска 1987–88 гг.	54 пуска 1985–2005 гг.	30 пусков с 2006 г. (на 28.02.2018 г.)

Примечание. * Масса двигателя в состоянии поставки означает массу двигателя без приводов, защиты и др.

Управление вектором тяги двигателя осуществляется благодаря созданию уникального сильфонного узла качания камер, работающего в зоне высокотемпературного газового потока. В 1987 и 1988 гг. выполнено два пуска РН «Энергия» с РД-170 (рис. 2) [3, 5, 6].

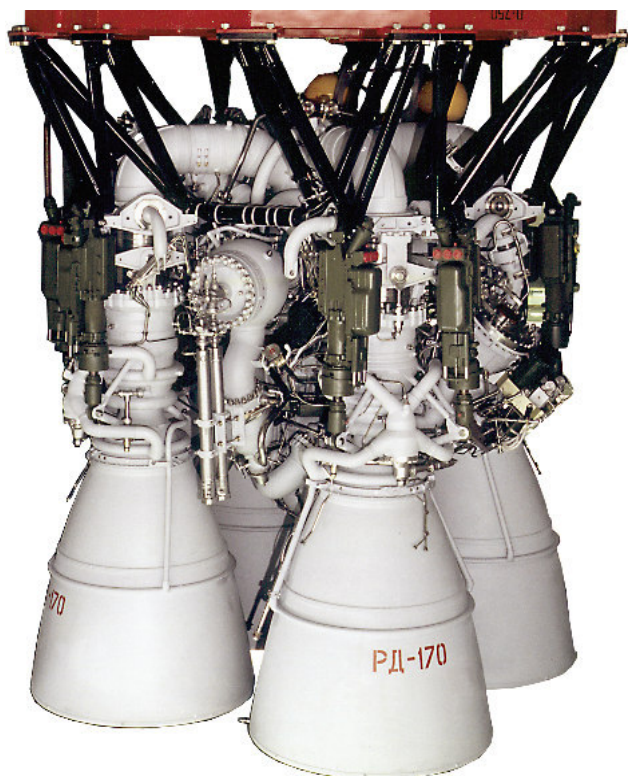


Рис. 1. Жидкостный ракетный двигатель РД-170 разработки НПО Энергомаш для сверхтяжелой РН «Энергия»

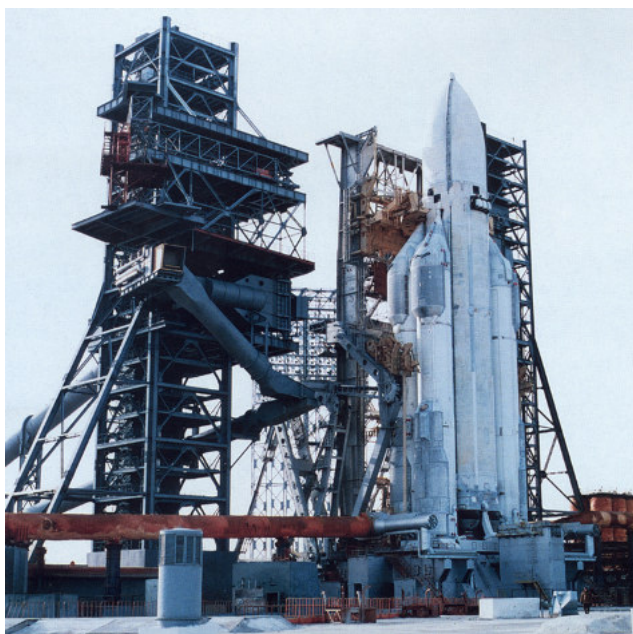


Рис. 2. На старте космодрома Байконур РН «Энергия», созданная РКК «Энергия» им. С.П. Королёва под руководством В.П. Глушко

Первый пуск РН «Зенит» с двигателем РД-171 (рис. 3) был осуществлен в апреле 1985 г. Эксплуатация РД-171 продолжилась при пусках РН «Зенит» с плавучего космодрома в районе экватора в Тихом океане (программа «Морской старт» (рис. 4) [7–9]). Первый пуск РН «Зенит-3SL» с двигателем РД-171 по программе «Морской старт» состоялся 28 марта 1998 г.

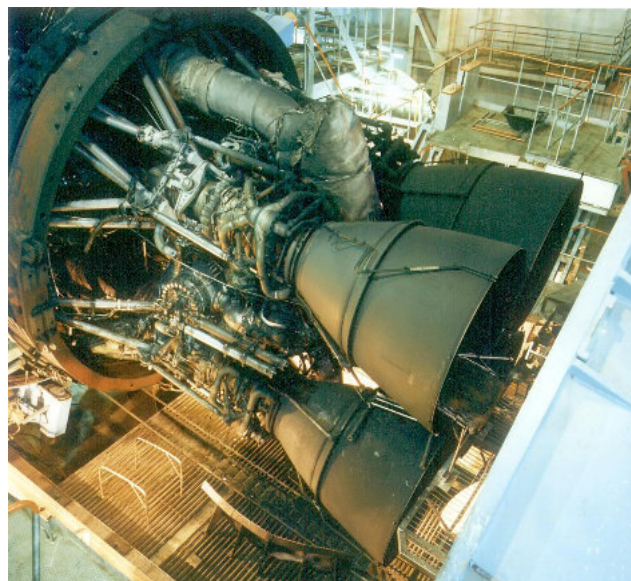


Рис. 3. Жидкостный ракетный двигатель РД-171 для РН «Зенит» на испытательном стенде НПО Энергомаш



Рис. 4. Пуск РН «Зенит» с плавучего космодрома в районе экватора в Тихом океане (программа «Морской старт»)

Модернизация двигателя РД-171 была продолжена в 2003–2004 гг. — в модернизированном двигателе РД-171М повышена надежность, упрощено регулирование работы, снижена масса, внесен ряд конструктивных изменений. Сертификация двигателя РД-171М завершена 05.07.2004 г. На сертификационном двигателе проведено восемь испытаний продолжительностью 1 093,6 с, причем последнее испытание (сверх плана) — на режиме 105%. Первый товарный двигатель РД-171М был поставлен в Украину 25 марта 2004 г. после проведения контрольно-технологических испытаний продолжительностью 140 с.

Первый пуск РН «Зенит-3SL» с новым модернизированным двигателем РД-171М по программе «Морской старт» был выполнен в феврале 2006 г. [7]. Первый пуск РН «Зенит-3SLБ» с РД-171М по программе «Наземный старт» с Байконура произведен 26.04.2008 г., а до этого был выполнен пуск РН «Зенит» в интересах Министерства обороны РФ. Последний пуск РН «Зенит» с двигателями РД-171М на первой ступени и РД-120 разработки НПО Энергомаш на второй ступени был осуществлен с Байконура 26.12.2017 г.

Серийное производство двигателя РД-171М, как и контрольно-технологические огневые испытания этих двигателей, осуществлялись НПО Энергомаш в г. Химки. Двигатели семейства РД-170/171 прошли более 1 000 стендовых огневых испытаний с общей наработкой более 110 000 с. За создание ЖРД РД-170/171 сотрудникам предприятия М.Р. Гнесину, Д.Е. Астахову и Г.Г. Деркачу была присуждена Ленинская премия.

В 2013 г. производство ракет «Зенит» было приостановлено, соответственно, было приостановлено и производство двигателей РД-171М.

ЖРД РД-180 для американской РН «Атлас»

В середине 1990-х гг. НПО Энергомаш вышло на международный рынок [1, 2]. В начале 1996 г. проект двигателя РД-180 НПО Энергомаш был признан победителем конкурса на разработку и поставку двигателя первой ступени для модернизированной РН «Атлас» американской компании *Lockheed Martin*. В этом конкурсе кроме РД-180 участвовали кислородно-керосиновый двигатель *MA-5D* фирмы *Rocketdyne* и российский двигатель НК-33 НПП «Труд» из Самары. Победу в конкурентной борьбе одержал РД-180 благодаря его основным характеристикам:

- *удельному импульсу* — достижение высокого импульса было обеспечено за счет высокого уровня давления в КС, а также за счет совершенства системы смесеобразования топлива в смесительной головке камеры;

- *широкому диапазону изменения тяги* — от 100 до 47%, что обеспечило возможность использования РД-180 для всего семейства РН «Атлас». В процессе отработки двигателя РД-180 продемонстрирована возможность длительной (более 300 с) устойчивой работы на режиме 40% тяги.

РД-180 — это двухкамерный двигатель на топливе кислород-керосин (*RP-1*) с дожиганием окислительного генераторного газа, с управлением вектором тяги путем качания каждой камеры в двух плоскостях, с возможностью обеспечения глубокого дросселирования тяги двигателя в полете. Данная конструкция базируется на хорошо проверенных конструкциях узлов и элементов двигателей РД-170/171. Основные параметры РД-180 следующие:

топливо	кислород + керосин (<i>RP-1</i>);
тяга, земная/пустотная	390,2/423,2 тс;
удельный импульс, земной/пустотный	3 064,6/3 325,1 м/с;
давление в камере сгорания	261,7 кгс/см ² ;
масса, сухая/залитая (в состоянии поставки)	5 180/5 480 кг;
габариты, высота/диаметр	3 600/3 200 мм;
период разработки	2014–2015 гг.;
количество и период пусков (на 28.02.2018 г.)	81 пуск с 2000 г.

Создание мощного двигателя первой ступени осуществлено в сжатые сроки, а отработка — на малом количестве материальной части. После подписания контракта на разработку двигателя летом 1996 г. уже в ноябре 1996 г. было проведено первое огневое испытание двигателя-прототипа, а в апреле 1997 г. — огневое испытание штатного двигателя. В 1997–98 гг. успешно проведена серия огневых испытаний двигателя в составе ступени РН в США [2].

Весной 1999 г. завершена сертификация двигателя для использования в составе РН «Атлас-3». Первый пуск РН «Атлас-3» с РД-180 состоялся в мае 2000 г. Летом 2001 г. была завершена сертификация двигателя для использования в составе РН «Атлас-5». Первый полет РН «Атлас-5» с двигателем РД-180 состоялся в августе 2002 г. (рис. 5).

За разработку и внедрение на мировой рынок двигателя РД-180 в декабре 2003 г. ведущим специалистам предприятия Б.И. Каторгину, В.К. Чванову, С.С. Головченко, В.Н. Худякову, Ф.Ю. Челькису, В.И. Семенову присуждена Государственная премия РФ по науке и технике.

Компания *Lockheed Martin* заявила в 1997 г. о намерении заказать не менее 101 двигателя РД-180 для использования в составе РН «Атлас-3» и «Атлас-5». Маркетингом и реализацией данного двигателя заказчику — компании *ULA* (совместному предприятию компаний *Boing* и *Lockheed*

Martin) — с целью установки на ракетах семейства «Атлас» занимается совместное предприятие РД АМРОСС, созданное НПО Энергомаш и *Pratt & Whitney* (США). В США уже поставлено около 100 товарных двигателей, успешно выполнено более 80 пусков РН «Атлас-3» и «Атлас-5» с двигателями РД-180 на первой ступени (рис. 6).



Рис. 5. Пуск американской РН «Атлас-5» с российским двигателем РД-180 на первой ступени



Рис. 6. Жидкостный ракетный двигатель РД-180 перед сборкой с РН «Атлас» в США

ЖРД РД-191 для отечественной РН «Ангара»

Разработка двигателя РД-191 началась в конце 1998 г. Этот двигатель с дожиганием окислительного газа предназначен для семейства отечественных РН «Ангара» [10]. Этот однокамерный кислородно-керосиновый двигатель, создаваемый также на основе конструкции узлов и элементов двигателей РД-170/171, является маршевым двигателем для унифицированного ракетного модуля первой ступени. Он отличается способностью глубокого дросселирования (до 27% от номинальной тяги), уникальной для маршевых двигателей первой ступени. В течение 1999 г. была выпущена конструкторская документация, в 2000 г. начата автономная отработка агрегатов двигателя РД-191, завершена подготовка производства. В мае 2001 г. собран первый доводочный двигатель РД-191. Первое огневое испытание двигателя РД-191 проведено в июле 2001 г. Основной принцип программы огневых доводочных испытаний — малое число двигателей и большая наработка на каждом экземпляре с максимальным количеством измерений. Основные параметры РД-191 на топливе кислород-керосин (РГ-1) следующие:

тяга, земная/пустотная	196/212,6 тс;
удельный импульс, земной/пустотный	3 049,8/3 307,5 м/с;
давление в камере сгорания	262,6 кгс/см ² ;
масса, сухая/залитая (в состоянии поставки)	2 290/2 520 кг;
габариты, высота/диаметр	4 000/1 450 мм;
период разработки	1999–2011 гг.;
количество и период пусков (на 28.02.2018 г.)	2 пуска в 2014 г. + 3 пуска РН KSLV-1 в 2009–2014 гг.

Двигатель РД-191 прошел все предусмотренные этапы отработки. В период отработки проводились ремонтные работы, а также переборки двигателя, в процессе которых вносились конструктивные изменения, позволявшие устранить причины возникавших дефектов. Отработка РД-191 в основном была завершена в октябре 2008 г. Его характеристики полностью соответствуют требованиям технического задания. Все агрегаты имеют наработку, превышающую ресурсную. Совместные испытания комплекта сопел крена с РД-191,

проведенные для оценки отбора горячего газа и частоты включений блока сопел крена на частотную устойчивость двигателя, установили, что параметры РД-191 соответствуют требованиям технического задания.

30.07.2009 г. в НИЦ РКП было успешно проведено первое огневое испытание универсального ракетного модуля УРМ-1 с ЖРД РД-191 разработки НПО Энергомаш в рамках программы создания РН «Ангара». Двигатель отработал в соответствии с циклограммой около 233 с, выйдя на режим 100% номинальной тяги (196 тс), а затем был дросселирован до 37,6% (73,7 тс). В ходе испытания было успешно проведено качание КС, а также штатно функционировал блок сопел крена. Осенью 2009 г. было успешно проведено еще два огневых испытания этого же двигателя в составе УРМ-1 в НИЦ РКП в г. Пересвет Московской области.

В НПО Энергомаш был успешно завершен этап межведомственных испытаний двигателя РД-191 — маршевого двигателя семейства РН «Ангара». Межведомственной комиссией, образованной совместным решением Космических войск Министерства обороны РФ и Федерального космического агентства, 17 мая 2011 г. подписан Акт, в котором констатировано, что двигатель РД-191 успешно завершил стадию наземной отработки и пригоден для использования в составе семейства РН «Ангара». Кроме того, рекомендовано присвоить конструкторской и технологической документации литеру О1, открывающую новому двигателю путь в серийное производство.

Коллектив предприятия впервые решил уникальную задачу — был создан мощный ЖРД, способный надежно работать в широком диапазоне изменения тяги — от 105 до 27% номинальной тяги. Двигатель РД-191 полностью удовлетворяет требованиям технического задания применительно к специфичным условиям работы в составе бокового и центрального блоков РН тяжелого класса «Ангара-5». В ходе доводки и в рамках производства и поставки товарных двигателей было проведено достаточно большое количество огневых стендовых испытаний двигателей, включая три наземных испытания в составе ракетного блока УРМ-1. Максимальная наработка на одном двигателе составила 3 635 с.

Завершение отработки двигателя РД-191 — важнейший этап развития отечественного

двигателестроения, демонстрирующий высочайший творческий потенциал коллектива НПО Энергомаш, а также всех ученых и специалистов двигателестроительной отрасли, принимавших участие в этой масштабной работе.

19.05.2011 г. НПО Энергомаш поставил в ГКНПЦ им. Хруничева первый товарный двигатель РД-191 № Д023, предназначенный для летно-конструкторских испытаний (ЛКИ) РН «Ангара-1.2», затем последовала поставка первого комплекта из пяти двигателей РД-191 для ЛКИ РН «Ангара-5». Первые летные испытания двигателей РД-191 проведены на РН «Ангара-1.2ПП» 09.06.2014 г. и на РН «Ангара-5» 23.12.2014 г. (рис. 7).



Рис. 7. Подготовка РН «Ангара-5» с ЖРД РД-191 к пуску на космодроме «Плесецк»

Наработка двигателей РД-191 в двух пусках семейства РН «Ангара» составила 1 415,3 с. Как и все представители ракетно-космической промышленности нашей страны, мы с нетерпением ждем продолжения ЛКИ ЖРД РД-191 в составе РН «Ангара-1.2» и «Ангара-5».

ЖРД РД-151 для южнокорейской РН KSLV-1

25.08.2009 г. состоялся пуск первой южнокорейской РН KSLV-1 (Naro). В составе первой ступени российского производства этой РН успешно отработал двигатель РД-151 — аналог ЖРД РД-191 разработки и производства НПО Энергомаш (рис. 8). В 2010 и 2014 гг. были выполнены второй и третий пуски этой РН. Нарработка двигателя в трех пусках РН KSLV-1 составила 607,4 с.



Рис. 8. Российский ЖРД РД-151 в составе южнокорейской ракеты-носителя KSLV-1

ЖРД РД-181 для американской РН «Антарес»

Ярким примером максимально быстрого создания двигателя для перспективной РН является история создания двигателя РД-181. Американская компания *Orbital Sciences Corporation* обратилась в 2014 г. в НПО Энергомаш с предложением о поставках однокамерного ЖРД для своей усовершенствованной РН «Антарес» на замену первоначально использовавшихся на первой ступени этой РН ЖРД АJ-26 компании *Aerojet*, являвшихся модификацией ЖРД НК-33 компании СНТК им. Н.Д. Кузнецова (г. Самара) [11]. Двигатель РД-181 в инициативном порядке был разработан специально для использования на модернизированной американской РН «Антарес» [12] (рис. 9).

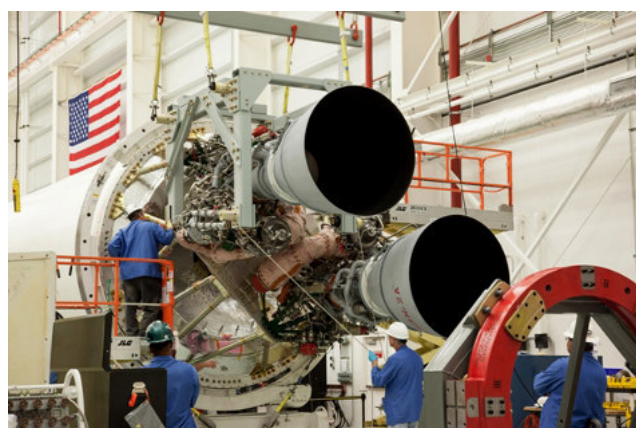


Рис. 9. Установка российского двигателя РД-181 на американскую РН «Антарес» в США

Двигатель РД-181 — это модификация РД-191, обеспечившего успешные первые пуски РН семейства «Ангара» в июле и декабре 2014 г. с космодрома Плесецк, но учитывающий особенности интерфейсов

РН «Антарес». Два РД-181 составляют двигательную установку первой ступени РН «Антарес». В производстве РД-181 используются современные материалы, новые технические и конструктивные решения. Использование РД-181 позволяет доставлять значительно большие полезные грузы на МКС и низкие орбиты.

Контракт по ЖРД РД-181 с компанией *Orbital* (США) был заключен 07.12.2014 г., а уже в марте 2015 г. было проведено первое огневое стендовое испытание ЖРД РД-181. Сертификация ЖРД РД-181 была завершена 07.05.2015 г. после проведения семи огневых испытаний одного двигателя с суммарной наработкой 1650 с. Основные параметры ЖРД РД-181 следующие:

топливо	кислород + керосин (RP-1);
тяга, земная/пустотная	196/212,6 тс;
удельный импульс, земной/пустотный	3 056,6/3 324,2 м/с;
давление в камере сгорания	261,7 кгс/см ² ;
масса, сухая/залитая (в состоянии поставки)	2 190/2 280 кг;
габариты, высота/диаметр	3 680/2 100 мм;
период разработки	2014–2015 гг.;
количество и период пусков (на 28.02.2018 г.)	2 пуска с 2016 г.

Первые товарные ЖРД РД-181 поставлены в США в июне 2015 г. 31.05.2016 г., еще до первого пуска усовершенствованной РН «Антарес», было проведено огневое испытание двух ЖРД РД-181 в составе первой ступени на стартовой позиции космодрома *Wallops* с суммарной наработкой 60 с. Первый пуск РН «Антарес» с первой ступенью, на которой установлены два российских двигателя РД-181, состоялся 17.10.2016 г., а 12.12.2017 г. состоялся второй пуск РН «Антарес». С помощью ЖРД РД-181 компания *Orbital ATK* выполняет полеты своего грузового КК *Cygnus* к МКС [12]. Программа поставок двигателей РД-181 в США продолжается.

Перспективы эксплуатации мощных ЖРД разработки НПО Энергомаш

Модернизация двигателя РД-171М, разработка двигателей РД-180, РД-191 и РД-181 стали венцом многолетней работы коллектива НПО Энергомаш, подтверждением конструкторских возможностей КБ, сохранения традиций школы академика В.П. Глушко, технологических

и производственных возможностей предприятия, способности на собственной испытательной базе проводить уникальные испытания двигателей в процессе их разработки, доводки и сертификации [1, 2, 5, 13]. Подтверждена сбалансированность и продуктивность всех структурных составляющих предприятия. В очередной раз НПО Энергомаш удалось организовать внутриотраслевую кооперацию, которая позволяет производить высокотехнологичную продукцию высочайшего качества с использованием только отечественных материалов и комплектующих. НПО Энергомаш не боится делиться частью работы с предприятиями отрасли, считая, что развитая, живая кооперация — не угроза конкуренции нашему предприятию, а разумная политика сохранения двигателестроительного направления космической промышленности РФ.

Можно с уверенностью говорить о продолжении дальнейшей эксплуатации описанных выше двигателей. Именно в ходе разработки двигателей РД-170/171 была создана основа для нового поколения кислородно-керосиновых двигателей (РД-170, РД-171, РД-120, РД-180, РД-171М, РД-191, РД-181 и др.), которые работали, работают и будут надежно работать в составе космических РН нашей страны и других государств в будущем [1].

Одним из важных событий 2017 г. для НПО Энергомаш стало принятие решения о запуске производства модернизированных ЖРД РД-171МВ для использования в составе перспективной российской РН «Союз-5». Теперь одной из ключевых задач на 2018 г. и последующие годы являются работы по началу производства РД-171МВ (на базе двигателя РД-171М) для РН «Союз-5». Эта РН должна в дальнейшем стать основой сверхтяжелой ракеты, задачу по созданию которой поставил лично Президент РФ. Еще 20 июня 2017 г. Распоряжением Правительства РФ РКК «Энергия» им. С.П. Королёва была определена головным разработчиком РН «Союз-5». 29 января 2018 г. был подписан Указ Президента РФ о создании на космодроме «Восточный» космического ракетного комплекса ракеты-носителя сверхтяжелого класса, головным разработчиком которой также была определена РКК «Энергия» им. С.П. Королёва, соисполнителями — РКЦ «Прогресс» и ЦЭНКИ.

В 2017 г. выпущен эскизный проект по двигателю РД-171МВ, который отличается

от прототипа новой системой регулирования, исключая использование импортных комплектующих, а также рядом технологических и конструктивных решений, отработанных при эксплуатации двигателей РД-180, РД-191, РД-181. При создании РД-171МВ впервые в отрасли будет комплексно решаться вопрос о переходе на цифровое проектирование. Для системного управления процессами, документацией и данными в течение жизненного цикла изделия начат перевод конструкторской документации РД-171МВ в электронный вид, что позволит отказаться от бумажных чертежей, обеспечить внедрение аддитивных технологий и более эффективно управлять конфигурацией изделия.

В 2018 г. НПО Энергомаш должно поставить РКЦ «Прогресс» макет двигателя. Первые испытания агрегатов РД-171МВ стартуют уже в 2019 г. В марте 2021 г. будет поставлен первый летный комплект, а в сентябре 2021 г. — второй летный комплект двигателей для РН «Союз-5» в беспилотном варианте. В 2022 г. будет осуществлен первый пуск РН «Союз-5». В 2023 г. НПО Энергомаш поставит заказчику уже полностью отработанный двигатель для использования на пилотируемой версии РН «Союз-5».

Ведутся работы по программе создания модификации двигателя РД-191 для первой и второй ступеней РН тяжелого класса «Ангара-А5П». В 2016 г. НПО Энергомаш изготовило демонстрационный двигатель РД-191М и провело его испытания в режиме 110% по тяге. НПО Энергомаш полностью готово к выпуску конструкторской документации и отработке этого двигателя. На двигателях РД-191 планируется осваивать технологию по изготовлению агрегатов с применением 3D-печати. Данная технология имеет ряд преимуществ перед традиционными, в т. ч., она позволяет существенно сократить трудоемкость при изготовлении деталей, а также реализовать практически все задумки конструкторов.

На двигателях РД-191М и РД-171МВ НПО Энергомаш предполагает освоить систему трехмерного проектирования. Это повлечет за собой модернизацию производства, контрольного аппарата, а реализация и освоение нового инструмента конструкторами и технологами позволит снизить затраты на разработку, повысить ее качество.

Очень важной задачей является внедрение аддитивных технологий в существующие

конструкции двигателей. Сформирована программа, которая должна обеспечить освоение конструкторами и технологами данного механизма и постепенное внедрение в двигатель РД-171МВ деталей и механизмов, изготовленных по этой технологии.

Относительно продолжения программы производства двигателя РД-180 можно отметить, что так называемые санкции, накладываемые правительством США, в первую очередь касаются ограничения использования российских двигателей при запуске космических аппаратов в интересах национальной безопасности США. Однако в США реализовываются большие программы по выводу на космические орбиты научных, исследовательских спутников по заказам NASA, в ближайшее время планируется начать программу пилотируемых запусков космических комплексов *CST-100 Starliner* компании *Boing* с использованием РН «Атлас-5» с двигателем РД-180. В США рассматриваются и другие варианты использования этой РН с двигателями РД-180. В связи с этим мы надеемся на продолжение производства двигателей РД-180 и их поставок в США.

НПО Энергомаш разработало ряд проектов по возможности создания многократных двигателей на базе кислородно-керосиновых двигателей. На базе двигателя РД-191 был разработан проект ЖРД многократного использования для МРКС (многократной ракетно-космической системы). С целью подтверждения характеристик ЖРД для многократного использования был создан и испытан экспериментальный двигатель, подтвердивший требуемые характеристики. Принципиально кислородно-керосиновые ЖРД НПО Энергомаш могут служить основой создания многократных конструкций.

Таким образом, семейство мощных кислородно-керосиновых ЖРД на основе двигателей РД-170/171 разработки и производства НПО Энергомаш находится в эксплуатации, имеет прочные и устойчивые планы продолжения эксплуатации в ближайшие годы, а также большие перспективы их эксплуатации и в отдаленном будущем.

АО «НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко» и сегодня остается мировым лидером в области разработки мощных ЖРД, поддерживая и укрепляя традиции, заложенные основателем и многолетним руководителем предприятия академиком Валентином Петровичем Глушко —

основоположником отечественного жидкостного ракетного двигателестроения, чье 110-летие со дня рождения мы отметили 2 сентября 2018 г.

Список литературы

1. НПО Энергомаш: 85 лет со дня основания. М.: Оружие и технологии, 2014. 104 с.
2. НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко. Путь в ракетной технике / Под ред. Б.И. Каторгина. М.: Машиностроение/Машиностроение-Полет, 2004. 488 с.
3. Блинов В.Н., Иванов Н.Н., Шалай Ю.В., Сеченов Н.В. Ракеты-носители. Проекты и реальность. Книга 1. Ракеты-носители России и Украины. Справочное пособие. Омск. Изд-во ОмГТУ, 2011. 382 с.
4. Соколов Б.А. Жидкостные ракетные двигатели, созданные ОКБ-1 – ЦКБЭМ – НПО «Энергия» – РКК «Энергия» им. С.П. Королёва (1957–2009 гг.) // Ракетно-космическая техника. Труды. Сер. XII. Королёв: РКК «Энергия». 2009. Вып. 1–2. С. 24–31.
5. Чванов В.К., Судаков В.С. Современные ЖРД ОАО НПО «Энергомаш» им. В.П. Глушко. Состояние программ и перспективы // Двигатель. 2011. № 4(76). С. 46–49.
6. Губанов Б.И. Триумф и трагедия «Энергии». Размышления главного конструктора. Т. 3. «Энергия – Буран». Нижний Новгород: Изд-во НИЭР, 1998. 432 с.
7. Филин В.М. Ракета космического назначения «Зенит-3SL» для программы «Морской старт» // Космическая техника и технологии. 2014. № 2(5). С. 40–48.
8. Семенов Ю.П., Зеленщиков Н.И., Черток Б.Е., Ашмарин Ю.А., Бобков О.Н., Каращтин В.М., Соколов Б.А., Синявский В.В. и др. (всего 80 авторов). Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва. 1946–1996 гг. М.: Изд. РКК «Энергия», 1996. 670 с.
9. Алиев В.Г., Легостаев В.П., Лопота В.А. Создание и пятнадцатилетний опыт эксплуатации ракетно-космической системы «Морской старт» // Космическая техника и технологии. 2014. № 2(5). С. 3–13.
10. Афанасьев И., Маринин И. Первый полет тяжелой «Ангары» // Новости космонавтики. 2015. № 02(385). С. 1–8.
11. Производитель НК-33 – ПАО «Кузнецов». Режим доступа: <http://www.kuznetsov-motors.ru/> (дата обращения 11.05.2018 г.).

12. *Antares*. Режим доступа: <https://www.orbitalatk.com/flight-systems/space-launch-vehicles/antares/default.aspx> (дата обращения 11.05.2018 г.).

13. Космонавтика. Энциклопедия / Под ред. В.П. Глушко. М.: Советская энциклопедия, 1985. 528 с.

Статья поступила в редакцию 23.04.2018 г.

Reference

1. *NPO Energomash: 85 let so dnya osnovaniya* [NPO Energomash: 85th anniversary of its foundation]. Moscow, *Oruzhie i tekhnologii publ.*, 2014. 104 p.
2. *NPO Energomash imeni akademika V.P.Glushko. Put' v raketnoy tekhnike* [NPO Energomash named after academician V.P. Glushko. A path in rocket technology]. Ed. by B.I. Katorgin. Moscow, *Mashinostroenie/Mashinostroenie-Polet publ.*, 2004. 488 p.
3. *Blinov V.N., Ivanov N.N., Shalay Yu.V., Sechenov N.V. Rakety-nositeli. Proekty i real'nost'. Kniga 1. Rakety-nositeli Rossii i Ukrainy. Spravochnoe posobie* [Launch vehicles. Projects and reality. Book 1. Launch vehicles of Russia and Ukraine. Reference aid]. Omsk, *OmGTU publ.*, 2011. 382 p.
4. *Sokolov B.A. Zhidkostnye raketnye dvigateli, sozdannye OKB-1 – TSKBEM – NPO «Energiya» – RKK «Energiya» im. S.P. Koroleva (1957–2009 gg.)* [Liquid rocket engines developed at OKB-1–TsKBEM–NPO Energia–S.P.Korolev RSC Energia (1957–2009)]. *Raketno-kosmicheskaya tekhnika. Trudy. Ser. XII. Korolev, RKK «Energiya» publ.*, 2009, issue 1–2, pp. 24–31.
5. *Chvanov V.K., Sudakov V.S. Sovremennyye ZhRD OAO NPO «Energomash» im. V.P. Glushko. Sostoyanie programm i perspektivy* [Modern liquid propellant engines of V.P. Glushko NPO Eneromash. Program status and future prospects]. *Dvigatel'*, 2011, no. 4(76), pp. 46–49.
6. *Gubanov B.I. Triumf i tragediya «Energii». Razmyshleniya glavnogo konstruktora. T. 3. «Energiya – Buran»* [Triumph and tragedy of Energia. Chief designer's thoughts. Vol. 3. Energia – Buran]. Nizhniy Novgorod, *NIER publ.*, 1998. 432 p.
7. *Filin V.M. Raketa kosmicheskogo naznacheniya «Zenit-3SL» dlya programmy «Morskoy start»* [Zenit-3SL integrated launch vehicle for Sea Launch program]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, 2014, no. 2(5), pp. 40–48.
8. *Semenov Yu.P., Zelenshchikov N.I., Chertok B.E., Ashmarin Yu.A., Bobkov O.N., Karashtin V.M., Sokolov B.A., Sinyavskiy V.V. etc. (altogether 80 authors). Raketno-kosmicheskaya korporatsiya «Energiya» imeni S.P. Koroleva. 1946–1996 gg.* [S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia. 1946–1996]. Moscow, *RKK «Energiya» publ.*, 1996. 670 p.
9. *Aliev V.G., Legostaev V.P., Lopota V.A. Sozdanie i pyatnadtsatiletniy opyt ekspluatatsii raketno-kosmicheskoy sistemy «Morskoy start»* [Development and fifteen-year operating experience of Sea Launch rocket and space system]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, 2014, no. 2(5), pp. 3–13.
10. *Afanas'ev I., Marinin I. Pervyy polet tyazhelyy «Angary»* [The first flight of the heavy Angara]. *Novosti kosmonavtiki*, 2015, no. 02(385), pp. 1–8.
11. *Proizvoditel' NK-33 – PAO «Kuznetsov»* [Manufacturer of NK-33 – PAO Kuznetsov]. Available at: <http://www.kuznetsov-motors.ru/> (accessed 11.05.2018).
12. *Antares*. Available at: <https://www.orbitalatk.com/flight-systems/space-launch-vehicles/antares/default.aspx> (accessed 11.05.2018).
13. *Kosmonavtika. Entsiklopediya* [Cosmonautics. Encyclopedia]. Ed. by V.P. Glushko. Moscow, *Sovetskaya entsiklopediya*, 1985. 528 p.