

УДК 621.454.3 (477)

А.С. Кириченко, И.П. Балицкий, В.В. Рогулин, Г.Н. Чепель, Н.И. Тутов

ОПЫТ ПРЕДПРИЯТИЯ ПО ОТРАБОТКЕ, УСТАНОВЛЕНИЮ И ПРОДЛЕНИЮ СРОКОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ МАРШЕВЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ТВЕРДОМ ТОПЛИВЕ

Приведены результаты экспериментальной отработки гарантийных сроков эксплуатации маршевых ракетных двигателей на твердом топливе. Рассмотрены некоторые особенности и методы испытаний по имитации действующих при эксплуатации ракетных двигателей механических и климатических нагрузок.

Наведено результати експериментального відпрацювання гарантійних строків експлуатації маршових ракетних двигунів на твердому паливі. Розглянуто деякі особливості та методи випробувань з імітації механічних і кліматичних навантажень, що діють під час експлуатації ракетних двигунів.

The results of tests of guaranteed service lives of main solid-propellant rocket motors are provided. The paper addresses some features and procedures for simulation of mechanical and weather loads acting on motors during operation.

Создание ракетно-космической техники на ГП "КБ "Южное" с самого начала ее развития было неразрывно связано с работами по обеспечению длительных гарантийных сроков эксплуатации ракет и их составных частей. Накопленный многолетний опыт отработки гарантийных сроков позволил на основе методических материалов, экспериментальных работ и рекомендаций продлевать сроки эксплуатации разработанных ракет-носителей (РН) свыше 20 лет [1–3].

Во второй половине XX столетия на ГП "КБ "Южное" были созданы маршевые ракетные двигатели на твердом топливе (РДТТ) для ракет ЗМ65 морского базирования, 15Ж60, 15Ж61 наземного базирования [4].

Вопросы отработки, установления гарантийных сроков маршевых РДТТ, подтверждения и продления сроков эксплуатации рассматриваются в настоящей статье.

Установление гарантийных сроков эксплуатации маршевого РДТТ для РН морского базирования. Разработка маршевого РДТТ (двигатель ЗД65) первой ступени ракеты ЗМ65 морского базирования стала серьезным испытанием для подразделений предприятия, которые решали задачи по отработке стойкости РДТТ к эксплуатационным воздействиям и установлению требуемых гарантийных сроков эксплуатации.

Отработка стойкости двигателя ЗД65 к внешним воздействующим факторам вклю-

чала в себя комплекс работ по получению данных, свидетельствующих о сохранении РДТТ технических характеристик в течение требуемых сроков эксплуатации. При этом объем работ, необходимый для установления срока гарантии (эксплуатации) РДТТ, определялся и отражался в комплексной программе экспериментальной отработки и частных программах-методиках эксплуатационных испытаний двигателя.

Испытания двигателя ЗД65 проводили как автономно, так и в составе ракеты ЗМ65 на раздельное и последовательное воздействие механических и климатических нагрузок. После каждого вида испытаний РДТТ подвергали дефектации и огневым стендовым испытаниям, по результатам которых оценивали его работоспособность.

Реализованные в процессе экспериментальной отработки виды автономных испытаний двигателя приведены на рис. 1.

Особенности проведенных испытаний по оценке стойкости РДТТ к воздействующим факторам условий эксплуатации заключались в следующем.

Транспортные испытания. При испытаниях проверяли безопасность и работоспособность РДТТ при и после воздействия на него механических нагрузок, возникающих при транспортировании двигателей в железнодорожном вагоне как автономно, так и в составе изделия ЗМ65 на требуемые

расстояния в различных климатических районах.

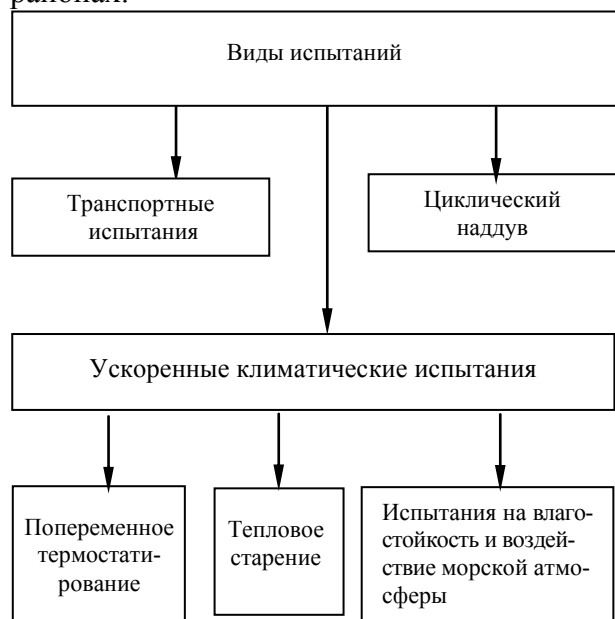


Рис. 1. Схема испытаний на раздельное воздействие нагрузок

Большие проблемы и сложности были связаны с проверкой влияния на двигатель нагрузок (ходовых вибраций и качки), возникающих в процессе длительной эксплуатации изделия на подвижном носителе – подводной лодке. КБ "Южное" совместно с другими предприятиями и НИИ отрасли была разработана специальная методика, в основу которой положена теория эквивалентных испытаний по накопленной степени повреждения в условиях автономных испытаний двигателя в горизонтальном положении и при его эксплуатации в составе изделия на подвижном носителе в вертикальном положении.

Методика испытаний предусматривала транспортирование двигателя по железной дороге на дополнительное (по сравнению с суммарным расстоянием транспортирования двигателя автономно и в составе изделия) расстояние, имитирующее по накопленным повреждениям воздействие нагрузок, возникающих при эксплуатации РДТТ на подвижном носителе.

С целью более точной имитации нагрузок от воздействия ходовых вибраций и качки на одном из этапов транспортных

испытаний проводили измерения действующих на двигатель 3Д65 нагрузок в различных условиях движения железнодорожного транспорта (разные скорости движения, спуски с "горок", торможение состава, ударные процессы при переходе стрелок железнодорожных путей) и расположения вагона с двигателем в составе транспорта (в начале, середине и конце состава). Проведенные измерения нагрузок в дальнейшем позволили уточнить расстояние транспортирования РДТТ и провести отработку двигателя 3Д65 в условиях, максимально приближенных к штатной эксплуатации.

Попеременное термостатирование – испытания на воздействие экстремальных температур эксплуатации. Испытания попеременным термостатированием проводили выдержкой РДТТ в камерах тепла и холода при максимальных, минимальных и нормальных температурах эксплуатации. Испытания проводили по следующей схеме:

$(15 \pm 10)^\circ\text{C} \rightarrow \text{от } 30 \text{ до } 50^\circ\text{C} \rightarrow (15 \pm 10)^\circ\text{C} \rightarrow \text{от } -10 \text{ до } -50^\circ\text{C}$.

Время выдержки РДТТ при нормальных температурах определяли из условия прогрева (охлаждения) двигателя до этих температур, а время выдержки при экстремальных положительных и отрицательных температурах соответствовало времени эксплуатации РДТТ при этих температурах. Количество циклов температурных воздействий назначали исходя из требований технического задания к условиям эксплуатации двигателя.

Следует отметить, что на начальном этапе отработки РДТТ из-за отсутствия камеры холода необходимых размеров испытания двигателя на воздействие отрицательных температур проводили следующим образом. Двигатель помещали в крытый железнодорожный вагон. Внутри вагона подавали смесь жидкого азота с воздухом, с помощью которой создавали и поддерживали требуемую отрицательную температуру во-

круг двигателя. В дальнейшем испытания двигателей на воздействие экстремальных температур проводили в специальных камерах холода и тепла.

Тепловое старение. При ускоренных климатических испытаниях проверяли работоспособность РДТТ после воздействия на него искусственно созданных климатических факторов, основными из которых являются температура и относительная влажность воздуха. Температурное воздействие имитировали попеременным термостатированием и испытаниями тепловым старением РДТТ.

Режимы теплового старения определяли согласно ГОСТ 9.707-81 в зависимости от заданной температуры хранения и эксплуатации, продолжительности эксплуатации и энергии активации процессов теплового старения примененных в РДТТ полимерных (композиционных) материалов.

Учитывая то, что в конструкции РДТТ применяется большое количество материалов с различной энергией активации, испытания двигателя проводились поэлементно. Отдельно тепловому старению подвергали такие узлы, как крышка переднего люка двигателя, сопловой блок, система гидравлических приводов, органопластиковый корпус.

В связи с отличиями энергии активации материалов корпуса и заряда твердого топлива тепловое старение корпуса двигателя проводили в два этапа. На первом этапе проводили предварительное тепловое старение корпуса по режиму старения внутреннего теплозащитного покрытия. После снаряжения корпуса зарядом твердого топлива проводили тепловое старение по режиму заряда твердого топлива, в процессе которого происходило "достаривание" материалов корпуса до имитируемого требуемого срока эксплуатации. Тепловое старение заряда в корпусе двигателя проводили продлением времени полимеризации заряда при его изготовлении.

Испытания на влагостойкость и воздействие морской атмосферы. При испыта-

ниях на влагостойкость РДТТ помещали в специальные камеры и выдерживали в заданных температурно-влажностных условиях в течение длительного времени. Испытания проводили при температуре 21 ± 2 °C и относительной влажности воздуха 95 ± 3 %.

Воздействие морской атмосферы (соляного тумана) имитировали распылением 3%-ного раствора NaCl при температуре 40 ± 3 °C и относительной влажности воздуха 95-98 %.

Перед испытаниями на влагостойкость и воздействие соляного тумана, в процессе и после испытаний проводили замер влажности воздуха внутри корпуса двигателя и в хвостовом отсеке изделия ЗМ65, который был пристыкован к двигателю. Существенных изменений относительной влажности воздуха в замкнутых герметичных отсеках не установлено.

Следует отметить, что испытаниям на такие воздействия РДТТ подвергали как автономно, так и в составе специальных макетов изделия ЗМ65.

В процессе испытаний в составе одного из макетов изделия из корпуса двигателя проводили отборы газовых проб для определения содержания летучих органических и неорганических веществ. Качественный и количественный составы газовыделений определяли с помощью газоанализатора и газоопределителя.

При испытаниях в составе другого макета изделия ЗМ65 двигатель подвергали испытаниям на воздействие соляного тумана и циклических температурных перепадов при температурах минус 10–30 °C и плюс 30–40 °C.

Испытания циклическим наддувом. В процессе эксплуатации на подводной лодке с целью компенсации действующих внешних гидродинамических нагрузок при старте ракеты из подводного состояния твердотопливные двигатели подвергаются предварительному (предстартовому) наддуву воздухом, который в своем составе может содержать большое количество механических примесей. Так, например,

применяемый в промышленности по ОСТ 92-1577-78 воздух содержит 0,4 мг/м³ примесей. В то же время в реальных условиях эксплуатации на подводной лодке содержание в воздухе наддува механических примесей может составлять свыше 300 мг/м³.

Для оценки влияния предварительного наддува на параметры выхода РДТТ на режим и его работоспособность проводили многократный (циклический) наддув двигателей. Один цикл включал:

- наддув внутренней полости РДТТ до определенного давления в течение заданного времени;
- выдержку в наддутом состоянии в течение нескольких часов;
- сброс давления из полости двигателя в течение нескольких минут.

Количество циклов и временные параметры наддува назначали таким образом, чтобы имитировать заданные условия предстартового наддува РДТТ. Наддув двигателя проводили как чистым, так и "загрязненным" воздухом. В качестве имитатора механических примесей в воздухе наддува был выбран микротальк МТ-ГШМ по ГОСТ 19284-73, который вводили во внутреннюю полость РДТТ на каждом цикле наддува с помощью специального смесителя [5]. Результаты последующего огневого стендового испытания показали, что наддув двигателя воздухом с механическими примесями не повлиял на характеристики выхода РДТТ на режим работы, надежность его запуска и работу на установившемся режиме.

Испытания на последовательное воздействие нагрузок. В процессе таких испытаний проверяли работоспособность РДТТ после комплекса воздействий температурно-влажностных и механических нагрузок. Последовательность испытаний определяли из условия максимальной имитации штатной эксплуатации РДТТ с учетом схемы прохождения двигателя от момента изготовления до его применения по прямому назначению. Эти испытания проводили после анализа результатов проверки

стойкости РДТТ к каждому отдельному воздействию (температура эксплуатации, повышенная влажность, транспортные нагрузки и т.п.) с постепенным увеличением объема нагрузок от внешних воздействующих факторов.

Этапы проведения испытаний приведены на рис. 2.



Рис. 2. Схема испытаний на последовательное воздействие нагрузок

Результаты этих испытаний позволили более полно проверить стойкость РДТТ к внешним воздействующим факторам и оценить состояние РДТТ в течение требуемых сроков эксплуатации.

Подтверждением правильности разработанных и опробованных методик испытаний РДТТ являются результаты штатной эксплуатации ракет и специальные испытания длительным хранением (испытания на долговечность).

Для двигателя ЗД65 подтверждение гарантийного срока эксплуатации проводили начиная после третьего года хранения в составе изделия ЗМ65 с последующей периодичностью через 2-3 года. Проводили дефектацию двигателей и проверяли их работоспособность при огневых стендовых испытаниях. Одновременно проверяли рабо-

тоспособность двигателей и при натурных испытаниях в составе изделий 3М65.

Продление срока эксплуатации двигателя 3Д65 проводили расчетным путем с учетом результатов экспериментальной отработки и реальной эксплуатации в составе изделий 3М65 [6]. В результате более чем 20-летней эксплуатации из-за двигателя 3Д65 не возникало аварийных ситуаций при многократных пусках изделий 3М65 [7]. Этими пусками была подтверждена высокая надежность двигателя 3Д65, разработанного ГП "КБ "Южное" с первоначально установленным гарантийным сроком эксплуатации в течение 10 лет.

Результаты наземной экспериментальной отработки двигателя 3Д65 и натурные пуски ракет 3М65 по истечении различных сроков эксплуатации полностью подтвердили работоспособность двигателей с сохранением требуемого уровня технических характеристик.

Методические основы проведения ускоренных испытаний маршевого РДТТ ракеты морского базирования были реализованы и при отработке маршевых РДТТ для РН наземного базирования.

Установление гарантийных сроков эксплуатации маршевых РДТТ для РН наземного базирования. В середине 70-х годов КБ "Южное" начало разработку твердотопливного ракетного комплекса в двух вариантах базирования: в подвижном с изделием 15Ж61 и стационарном с изделием 15Ж60. Твердотопливному КБ была поручена разработка маршевых двигательных установок первой (двигатели 15Д206, 15Д305) и второй (двигатели 15Д290, 15Д339) ступеней ракет.

Твердотопливные двигатели маршевых ступеней РН были созданы на основе базовых технических решений с использованием высокоэнергетических смесевых твердых топлив, корпусов из высокопрочных органических волокон и уникальных сопловых блоков со вдувом внутрикамерного газа РДТТ в закритическую часть сопла, раздвижных телескопических сопел, поворотного управляющего сопла на эластичном опорном шарнире.

С целью значительного сокращения объемов и сроков экспериментальной отработки двигатель 15Д206 для изделия 15Ж61 был спроектирован практически как полный аналог двигателя 3Д65. В нем сохранили принятые для двигателя 3Д65 рецептуру и форму заряда твердого топлива, конструкцию корпуса и соплового блока.

По двигателям вторых ступеней РН были приняты многие решения по аналогии с реализованными в двигателях 3Д65, 15Д206: органопластиковый корпус типа "кокон", прочно скрепленный с корпусом заряд твердого топлива, эффективные теплозащитные и эрозионно-стойкие материалы в конструкции корпуса и сопла [4].

Для изделия 15Ж60 была спроектирована двигательная установка 15Д305 с центральным поворотным управляющим соплом на эластичном опорном шарнире.

Отработку и установление гарантийных сроков эксплуатации разработанных РДТТ проводили так же, как и для двигателя 3Д65, на этапе автономной экспериментальной отработки. Испытаниям подвергали изделия с отработанными по основным техническим характеристикам составными частями двигателей (крышки люков передних днищ корпусов, снаряженные корпуса, сопловые блоки и другие узлы изделий).

Эксплуатационные испытания РДТТ проводили на раздельное и комплексное (последовательное) воздействие нагрузок:

- ПТС – попеременное термостатирование на воздействие экстремальных температур эксплуатации;
- УКИ (тепловое старение) – ускоренные климатические испытания на воздействии температурно-влажностных условий эксплуатации;
- УКИ → ПТС;
- ПТС при минимальных температурах эксплуатации.

Режимы испытаний ПТС и УКИ РДТТ и их составных частей были аналогичны режимам испытаний двигателя 3Д65. При этом автономное тепловое старение корпусов и корпусов снаряженных двигателей 15Д290 и 15Д339 вторых ступеней РН 15Ж61, 15Ж60 не проводили.

Испытания ПТС двигателей первых и вторых ступеней РН на воздействие минимальных температур эксплуатации проводили по режимам термостатирования корпусов снаряженных РДТТ таким образом, чтобы симитировать требуемые сроки эксплуатации и подтвердить сохранность прочностных свойств по максимальным деформациям в зоне канала заряда твердого топлива и растягивающих напряжений на границе "заряд – корпус" (по клеевому соединению заряда твердого топлива с корпусом двигателя).

Испытания проводили при температурах минус 5, 0, плюс 5 °С. Продолжительность испытаний рассчитывали и назначали из условия обеспечения эквивалентности степеней повреждаемости заряда твердого топлива при эксплуатации и в режиме испытаний [8]. Условие эквивалентности режимов испытаний и эксплуатации, которое предполагает равенство накопленных повреждений, было получено с использованием уравнений долговечности зарядов твердого топлива.

Подтверждение гарантийного срока эксплуатации двигателей 15Д206, 15Д290 проводили после завершения установленного срока хранения проверкой их работоспособности при натуральных испытаниях в составе изделий 15Ж61. Этими испытаниями были подтверждены установленные гарантийные сроки как для РДТТ, так и для изделия 15Ж61.

После подтверждения установленных сроков эксплуатации двигателей 15Д206 и 15Д290 для оценки возможности их продления были проведены дополнительные испытания на воздействие температур эксплуатации.

Испытания двигателей ПТС проводили при температурах окружающей среды от 0 до минус 15 °С и при нормальных температурах от 5 до 15 °С.

Испытания на воздействие минимальных температур эксплуатации (имитация длительного воздействия перепадов температур и массовых сил на работоспособность зарядов твердого топлива двигателей) проводили по специальным рассчитанным ре-

жимам, аналогичным режимам испытаний двигателей при автономной отработке [8].

Перед и после температурных испытаний проводили дефектацию двигателей. При проверке ударно-акустическим и ультразвуковым контролем отслоения зарядов твердого топлива от корпусов двигателей не обнаружено. В процессе последующих огневых стендовых испытаний двигатели 15Д206 и 15Д290 сохранили свою работоспособность с обеспечением требуемых технических и энергетических характеристик.

Для двигателей 15Д305, 15Д339 подтверждение гарантийных сроков не проводили. После истечения установленных сроков хранения изделия 15Ж60 и их РДТТ были определены для утилизации.

С целью определения возможности продления сроков эксплуатации двигателей в составе изделий 15Ж61 и сроков безопасного хранения снаряженных корпусов двигателей изделий 15Ж61, 15Ж60 в процессе их утилизации был проведен цикл работ с образцами твердого ракетного топлива. Для этой цели из корпусов двигателей вырезали образцы топлива, проводили их тестирование до и после ускоренных испытаний тепловым старением [9]. Состояние твердых топлив снаряженных корпусов двигателей на безопасность при эксплуатации, хранении и утилизации определяли по следующим тестам: физико-механические характеристики при растяжении и сжатии образцов топлива, чувствительность к детонации при ударе, на термостойкость, скорость горения топлив и другие. При тестировании твердых топлив были получены положительные результаты для установления дополнительных сроков эксплуатации и безопасного хранения двигателей до утилизации [2].

Результаты работ показали, что проведенный на этапе экспериментальной отработки объем испытаний крупногабаритных маршевых РДТТ ступеней ракет является достаточным как для установления требуемого гарантийного срока эксплуатации изделий, так и для определения возможности дальнейшего продления их сроков эксплуатации и хранения.

В результате многолетних исследований также было установлено, что реализованные режимы испытаний и реальные условия внешних воздействующих факторов при длительной эксплуатации изделий не привели к появлению дефектов и неисправностей в конструкции РДТТ. Технические характеристики двигателей при использовании соответствовали требованиям конструкторской документации.

Разработка маршевых РДТТ для ракет-носителей как с требуемыми гарантийными сроками, так и с продленными сроками эксплуатации стала возможна благодаря творческому подходу и плодотворному сотрудничеству квалифицированных специалистов ГП "КБ "Южное", ПМЗ, ГП ПО ЮМЗ, ОАО "ФНПЦ "Алтай", ФГУП "ФЦДТ "Союз", ГРЦ "КБ им. академика В.П. Макеева", ОАО ЦНИИСМ и других смежных организаций Украины и Российской Федерации.

Таким образом, многолетний опыт экспериментальной отработки РДТТ различного назначения, положительные результаты эксплуатации ракет-носителей и разработанные методики испытаний позволили на достаточно высоком техническом уровне и с минимальными временными и материальными затратами провести оценку стойкости РДТТ к внешним воздействующим факторам эксплуатации.

Правильность разработанных методических материалов ускоренных испытаний РДТТ экспериментально подтверждена автономной отработкой и успешными пусками ракет-носителей морского и наземного базирования.

Накопленный на ГП "КБ "Южное" опыт отработки маршевых РДТТ позволяет экспериментально обосновать как подтверждение заданных гарантийных сроков эксплуатации, так и возможность их продления до требуемых значений.

Список использованной литературы

1. Шапошников В.А., Уткин В.Ф., Беляев Н.М. Оценка гарантийных сроков эксплуатации боевых ракет (на этапах проектирования и конструкторской отработки). – М.: Машиностроение, 1967. – 164 с.

2. Призваны временем. От противостояния к международному сотрудничеству / Под общ. ред. С.Н. Конюхова. – Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2004. – 768 с.

3. Машенко А.Н., Шевцов Е.И., Назаренко О.П. и др. Опыт работы КБ "Южное" по продлению сроков эксплуатации боевой ракетной техники свыше установленных гарантийных сроков // Космическая техника. Ракетное вооружение: Сб. науч.-техн. ст. – Днепропетровск: ГП "КБ "Южное", 2011. – Вып. 2. – С. 72–84.

4. Кириченко А.С., Кушнир Б.И., Енотов В.Г. Ракетные двигатели на твердом топливе разработки Государственного конструкторского бюро "Южное" // Космическая техника. Ракетное вооружение: Сб. науч.-техн. ст. – Днепропетровск: ГП "КБ "Южное", 2004. – Вып. 1. – С. 211–228.

5. А. с. 869800 СССР, МКИ В 01 F 5/00. Смеситель / С.Л. Арсеньев, Н.А. Калашников, Л.А. Клименко, Н.Н. Перминов, Н.И. Тутов (СССР). – №2863175/23-26; Заявлено 03.01.80; Опубл. 07.10.81, Бюл. № 37.

6. Тутов Н.И., Чепель Г.Н., Ушкин Н.П., Кириченко А.С. О некоторых методических особенностях оценки возможности продления сроков эксплуатации изделий // Космическая техника. Ракетное вооружение: Сб. науч.-техн. ст. – Днепропетровск: ГП "КБ "Южное", 2008. – Вып. 1. – С. 128–145.

7. Дегтярь В.Г., Данилкин В.А. Сотрудничество, проверенное временем // Космическая техника. Ракетное вооружение: Сб. науч.-техн. ст. – Днепропетровск: ГП "КБ "Южное", 2004. – Вып. 1. – С. 55–59.

8. Кириченко А.С., Тутов Н.И., Ушкин Н.П., Шнякин В.Н. Проблемы длительной эксплуатации и экспериментальное подтверждение ресурса крупногабаритных РДТТ // Космическая техника. Ракетное вооружение: Сб. науч.-техн. ст. – Днепропетровск: ГП "КБ "Южное", 2011. – Вып. 2. – С. 100–111.

9. Пат. 69539 України. МПК С 06В 43/00, F 42В 39/00, G 01 N 17/00. Спосіб випробувань виробів з полімерних матеріалів на старіння / М.І. Тутов, А.С. Кириченко, І.П. Баліцький, О.О. Трегубенко, Л.М. Шиман, С.Б. Устименко, Л.І. Підкаменна (Україна); заявник та власник Державне конструкторське бюро "Південне" ім. М.К. Янгеля, Державне підприємство "Виробниче об'єднання "Павлоградський хімічний завод". – № 2003076704; Заявлено 16.07.2003; Опубл. 10.12.2007, Бюл. № 20.

Статья поступила 30.01.2014