

УДК 621.454.3(477)

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

## ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ОТРАБОТКИ СРОКОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ И БЕЗОПАСНОГО ХРАНЕНИЯ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ТВЕРДОМ ТОПЛИВЕ

*Приведены результаты экспериментальной отработки гарантийных сроков эксплуатации 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 ракетних двигунів на твердому паливі. Розглянуто деякі особливості та методи випробувань з імітації існуючих під час експлуатації ракетних двигунів механічних і кліматичних навантажень.*

*The results of experimental verification of solid rocket motors warranty periods are presented. Some peculiarities and methods of tests with simulation of rocket motor operational mechanical and environmental loads are considered.*

Создание и развитие ракетно-космической техники на ГП "КБ "Южное" неразрывно связано с работами по обеспечению высокой надежности и максимальных гарантийных сроков эксплуатации ракетносителей (РН), в конструкциях которых нашли широкое применение ракетные двигатели на твердом топливе (РДТТ). Создание РДТТ неразрывно связано с работами по обеспечению их эффективности, безопасности и требуемых длительных сроков эксплуатации как составных частей двигателей – зарядов твердого топлива, воспламенителей, теплозащитных покрытий, резинотехнических деталей и других элементов, так и двигателей в целом [1–3].

За более чем 50-летний период на ГП "КБ "Южное" были разработаны одиннадцать типов крупногабаритных маршевых двигателей и несколько десятков специальных малогабаритных РДТТ различного назначения [4–7].

### **Маршевые РДТТ для ракет-носителей морского и наземного базирования**

Для первой ступени ракеты 3М65 морского базирования в КБ "Южное" был создан маршевый крупногабаритный двигатель 3Д65. Для первых и вторых ступеней ракет 15Ж60, 15Ж61 наземного базирования с шахтными пусковыми установками и на подвижном железнодорожном комплексе использовались маршевые двигатели

15Д305, 15Д339 и 15Д206, 15Д290 соответственно [2, 4].

При установлении гарантийных сроков была проведена отработка стойкости двигателей к внешним воздействующим факторам заданных условий эксплуатации. В процессе экспериментальной отработки испытания РДТТ проводили на раздельное и последовательное воздействие механических и климатических нагрузок. Вопросы отработки, установления гарантийных сроков, а также подтверждения и продления сроков эксплуатации маршевых РДТТ рассмотрены в статьях [8–10]. Особенности проведения некоторых видов испытаний заключались в следующем.

Эксплуатация двигателей 3Д65, 15Д206, 15Д290 в течение гарантийных сроков в основном проводилась на подвижных носителях: на подводной лодке – двигатель 3Д65 в составе ракеты 3М65 в вертикальном положении и на железнодорожном комплексе – двигатели 15Д206 и 15Д290 в составе ракеты 15Ж61 в горизонтальном положении. Двигатель 15Д206 был спроектирован как полный аналог двигателя 3Д65. В нем были сохранены принятые для 3Д65 рецептура твердого топлива и форма заряда, конструкция корпуса и соплового блока. Отработка и установление гарантийных сроков разработанных РДТТ проводились с учетом условий их эксплуатации.

Для проверки влияния на двигатель 3Д65 нагрузок (ходовых вибраций и качки), возникающих в процессе длительной эксплуатации на подводной лодке, была разработана специальная методика проведения испытаний. В основу методики была положена теория эквивалентности накопленной степени повреждения заряда твердого топлива в условиях автономных испытаний двигателя в горизонтальном положении и при его эксплуатации на подвижном носителе в вертикальном положении. Методика испытаний предусматривала транспортирование двигателя по железной дороге на дополнительное расстояние (по сравнению с суммарным расстоянием транспортирования двигателя автономно и в составе изделия 3М65), имитирующее по накопленным повреждениям воздействие нагрузок, возникающих при эксплуатации РДТТ на подвижном носителе.

Испытания двигателей 15Д206 и 15Д290 на длительное воздействие нагрузок при эксплуатации в составе изделия 15Ж61 проводились следующим образом. Двигатели в инертном исполнении зарядов твердого топлива испытывали в составе изделия на вибрационном стенде. Двигатели со штатными (реальными) зарядами твердого топлива в составе изделия 15Ж61 перевозили железнодорожным транспортом на расстояние более 100 тыс. км.

По завершении транспортных испытаний двигатели 3Д65, 15Д206, 15Д290 и их составные части (крышки люков передних днищ, сопловые блоки и др.) прошли дефектацию и огневые стендовые испытания для подтверждения их работоспособности после имитации воздействия экстремальных механических нагрузок.

Для установления требуемых гарантийных сроков были проведены ускоренные климатические испытания, после которых проверялась работоспособность маршевых РДТТ после воздействия на них искусственно созданных заданных климатических условий. Климатические воздействия имитировались испытаниями попеременным термостатированием при отрицательных и положительных температурах эксплуатации, тепловым старением и испыта-

ниями на влагостойкость и воздействие морской атмосферы.

При проведении испытаний тепловым старением и на влагостойкость, в том числе и на воздействие морской атмосферы, внутри корпусов двигателей 3Д65 и 15Д206 замерялись составы газовыделений из материалов узлов и относительной влажности воздуха. Существенных изменений по составу газовой среды и влажности воздуха в замкнутых герметичных отсеках изделий не установлено.

Следует отметить, что тепловое старение корпусов двигателей проходило в два этапа: на первом проводилось тепловое старение по режиму материала внутреннего теплозащитного покрытия корпуса, затем, во время снаряжения корпуса зарядом твердого топлива, продлением режима полимеризации подвергся тепловому старению заряд твердого топлива, в процессе которого происходило достаривание материалов корпуса до имитируемого требуемого срока эксплуатации.

При попеременном термостатировании двигателей первых и вторых ступеней РН 15Ж61, 15Ж60 имитировалось воздействие минимальных температур эксплуатации ( $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) в течение требуемых сроков эксплуатации РДТТ [8]. Испытания проводились для подтверждения сохранности прочностных свойств по максимальным деформациям в зоне канала заряда твердого топлива и растягивающих напряжений на границе "заряд – корпус" (по клеевому соединению заряда с корпусом двигателя). Продолжительность испытаний рассчитывали из условия обеспечения эквивалентности степени повреждаемости заряда твердого топлива при эксплуатации и во время проведения испытаний. Условие эквивалентности режимов испытаний и условий эксплуатации, которое предполагает равенство величин накопленных повреждений, было получено с использованием уравнений долговечности зарядов твердого топлива для двигателей.

С целью определения возможности продления сроков эксплуатации двигателей и сроков безопасного хранения снаряженных корпусов двигателей изделий 15Ж61,

15Ж60 в процессе их утилизации был проведен цикл работ с образцами твердого ракетного топлива. Актуальность таких исследований обусловлена тем, что к моменту ввода в эксплуатацию специального оборудования для утилизации твердых ракетных топлив для всех снаряженных корпусов двигателей имелись запредельные сроки хранения. Исследования проводились на вырезанных из корпусов двигателей образцах твердого топлива для определения изменения его свойств (физико-механических характеристик при растяжении и сжатии образцов топлива, термостойкости, скорости горения, чувствительности к детонации при ударе и др.). Тестирование образцов твердого топлива проходило до и после ускоренных климатических испытаний способом теплового старения по методике, разработанной специалистами КБ "Южное" и НПО ПХЗ. При тестировании твердых топлив были получены положительные результаты для установления дополнительных сроков эксплуатации и безопасного хранения двигателей до их утилизации [2, 10, 11].

Рассмотренные выше особенности и методический подход к отработке и установлению сроков эксплуатации и хранения позволили провести оценку стойкости маршевых РДТТ к внешним воздействующим факторам эксплуатации для твердотопливных ракет-носителей 3М65, 15Ж61, 15Ж60.

#### **Специальные малогабаритные РДТТ ракет-носителей**

Малогабаритные РДТТ, пороховые аккумуляторы давления (ПАД) и пороховые газогенераторы нашли применение практически во всех ракетах разработки КБ "Южное" как для РН с твердотопливными, так и с жидкостными ракетными двигателями.

Спектр сложных и ответственных технических задач, решаемых с помощью разработанных РДТТ и ПАДов, широк и многообразен [5]:

- минометный старт ракеты;
- торможение отработавших ступеней РН;
- отделение и увод с траектории полета ракеты различных объектов;

- стабилизация объектов вращением и другие решаемые цели и задачи.

В процессе экспериментальной отработки такие РДТТ и ПАДы подвергались эксплуатационным испытаниям на воздействие факторов, которые, как предполагается, могут влиять на их работу в процессе эксплуатации как автономно, так и в составе ракет-носителей. Из всех видов внешних воздействующих факторов наиболее общими для РДТТ различного назначения (и в то же время одними из трудновоспроизводимых в лабораторно-стендовых условиях) являются механические и климатические воздействия.

Принципиально объем и порядок работ по оценке стойкости к внешним воздействующим факторам малогабаритных РДТТ и ПАДов не отличался от экспериментальной отработки крупногабаритных РДТТ. Эксплуатационные испытания проводились на раздельное и последовательное воздействие механических и климатических нагрузок. После каждого вида испытаний изделия подвергались дефектации и огневому стендовому испытанию, по результатам которых оценивалась их работоспособность.

В общем виде, в зависимости от заданных условий эксплуатации изделий автономно и в составе РН, испытания на последовательное воздействие нагрузок проходили по следующей схеме: транспортные испытания → попеременное термостатирование → ускоренные климатические испытания → вибрационные и виброимпульсные испытания → дефектация → огневые стендовые испытания.

При проведении испытаний режимы выбирались таким образом, чтобы проимитировать наиболее неблагоприятные для изделий условия эксплуатации в течение требуемого гарантийного срока.

При испытаниях на транспортные нагрузки, на воздействие механических нагрузок при старте и полете РН (виброимпульсные и вибрационные нагрузки) проверялись прочность, безопасность и способность РДТТ и ПАДов противостоять воздействию механических факторов, возникающих в процессе эксплуатации. Нагрузки прикладывались к

испытываемым изделиям в трех взаимно перпендикулярных направлениях. К столу ударного и вибрационного стенов изделия крепились с помощью переходников, имитирующих их крепление при автономном транспортировании в упаковках и на РН.

При имитации длительного железнодорожного транспортирования малогабаритных РДТТ и ПАДов в составе ракеты-носителя 15Ж61 использовался вибростенд ВЭДС-1500 с максимальной грузоподъемностью испытываемых изделий не более 300 кг. Для проведения испытаний изделий с массой более 300-500 кг использовали специальное устройство, на котором изделия подвешивали на упругой подвеске, что обеспечивало разгрузку стола вибростенда и позволяло испытывать РДТТ и ПАДы при требуемых вибрационных нагрузках.

Режимы испытаний назначались таким образом, чтобы обеспечить эквивалентность изменений в конструкции изделия при имитации транспортных нагрузок на испытательном стенде и при штатном транспортировании автономно в упаковках и в составе РН.

Критерием возможной неисправности РДТТ и ПАДов при транспортировании является их усталостное разрушение. Из условия эквивалентности усталостных повреждений при номинальном (эксплуатационном) и форсированном нагружении была получена зависимость режимов испытаний изделий

$$T_n (A_n)^\alpha = T_\phi (A_\phi)^\alpha, \quad (1)$$

из которой определяли длительность форсированного режима вибрационного нагружения

$$T_\phi = T_n \left( \frac{A_n}{A_\phi} \right)^\alpha, \quad (2)$$

где  $T_n$  – длительность номинального режима;  $A_n$ ,  $A_\phi$  – амплитуда виброускорения при номинальном и форсированном режимах нагружения;  $\alpha$  – нормативный показатель кривой усталости, принятый равным 4 для случая длительной транспортировки изделий.

Испытания проводились как на фиксированных частотах (10, 15, 20 Гц), так и при

плавно изменяющихся частотах (20-40, 40-100 Гц) при амплитудах виброускорений от 0,4 g до 1,6 g. Длительность испытаний при форсированном режиме  $T_\phi$  составила несколько десятков часов.

После вибрационных испытаний РДТТ и ПАДы подвергались дефектации, сборке и огневым стендовым испытаниям, по результатам которых оценивалась работоспособность этих изделий.

Разработанный метод имитации транспортных нагрузок показал высокую эффективность при реализации (по сравнению с технологией испытаний, предусматривающей транспортирование РДТТ и ПАДов на требуемые расстояния по железной дороге).

Указанный метод имитации нагрузок позволил:

- обеспечить эквивалентность режимов испытаний реальным условиям нагружения при эксплуатации;
- сократить длительность испытаний и сроки отработки специальных РДТТ и ПАДов.

Следует отметить, что на длительность срока эксплуатации изделий непосредственное влияние оказывают процессы, происходящие внутри корпуса РДТТ или ПАДа. Известны случаи, когда под воздействием газовыделений из материала теплозащитного покрытия корпуса двигателя полностью разложился небольшой заряд из баллистического топлива. В работе [12] отмечено, что на это обстоятельство необходимо обращать серьезное внимание:

- при проектной разработке – на подбор пары "топливо – теплозащитное покрытие" и по возможности исключать сочетание "малая масса и поверхность заряда из баллистического топлива – большая масса и поверхность теплозащитного покрытия, из которого возможны газовыделения, например, аммиака";
- при экспериментальной отработке – на влияние факторов эксплуатации и процессов в камере (газовыделений) на основные характеристики изделий при их использовании.

При экспериментальной отработке требуемого гарантийного срока эксплуатации

одного типа РДТТ после теплового старения из внутренней полости двигателя выделялся газ желто-коричневого цвета с резким запахом. На поверхности теплозащитного покрытия (ТЗП) внутренней части корпусов был обнаружен маслянистый светло-коричневый налет.

Для выяснения химической природы появления маслянистых пятен и газовыделений был проведен ряд экспериментов. Испытания на тепловое старение образцов топлива проводились в контакте с образцами теплозащитных покрытий. Проведенный анализ показал, что появление маслянистых пятен на поверхности ТЗП является следствием миграции пластификатора топлива в условиях повышенных температур и его взаимодействия с компонентами ТЗП корпуса.

Результаты газового анализа и конденсата на поверхности ТЗП корпуса, отобранного из внутренней части двигателя после теплового старения, показали, что внутри корпуса в основном содержалась воздушная среда ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{Ar}$ ) и присутствовал аммиак  $\text{NH}_3$ .

В дальнейшем, после длительных сроков эксплуатации и при проведении работ по оценке возможности продления сроков эксплуатации таких двигателей, характер изменения состояния топлива и ТЗП сохранился и не оказал влияния на работоспособность РДТТ при проведении огневых стендовых испытаний. Результаты работ позволили продлить срок эксплуатации двигателей более чем в 1,5 раза по сравнению с ранее установленным гарантийным сроком.

Наряду с установлением гарантийных сроков в КБ "Южное" проводились работы и по продлению сроков эксплуатации РДТТ торможения отработавших ступеней ракетносителей семейства "Циклон" и "Зенит" (программы "Морской старт" и "Наземный старт") [13, 14].

При испытаниях попеременным термостатированием (ПТС) имитировалось воздействие на двигатели экстремальных температур эксплуатации, действующих при транспортировании различными видами транспорта и при хранении в местах эксплуатации РН

"Зенит" (в местах расположения пусковых установок).

Для приближения режимов испытаний к реальным условиям эксплуатации двигателя и исключения действия на материалы конструкции значительного перепада температур при переходе от нормальных климатических условий к условиям с экстремальными температурами была принята ступенчатая схема проведения испытаний ПТС [15]. При таких испытаниях температуру в камерах термостатирования доводили до выбранных значений температур, например до  $-5$  или до  $+30$  °С, близких к заданным условиям эксплуатации двигателей. Затем двигатель ступенчато через  $5 - 15$  °С охлаждали (нагревали) при изменении температуры в камере до промежуточных температур, приближаясь к заданным значениям экстремальных температур эксплуатации, например  $-40$  и  $+50$  °С.

После достижения в камерах минимальных (максимальных) значений экстремальных температур двигатель выдерживали при этих температурах, а затем температуру в камере ступенчато изменяли до нормальных климатических условий. Суммарное время выдержки двигателя при промежуточных и экстремальных температурах составляло не менее (или равном) времени пребывания двигателя при этих температурах в реальных условиях эксплуатации.

Ускоренными климатическими испытаниями воспроизводилось естественное старение материалов двигателя под воздействием температурного влияния окружающей среды в течение заданного срока эксплуатации.

Для исключения термоударов (большого перепада температур  $\sim 40$  °С) на материалы конструкции, связанных с помещением двигателя из нормальных условий (начальная температура составляет от  $15$  до  $25$  °С) в термокамеру с принятой температурой теплового старения (например  $70$  °С), была принята так же, как и для испытаний ПТС, ступенчатая схема проведения теплового старения [16].

Продолжительность выдержки двигателя при промежуточных температурах и при температуре теплового старения определялась таким образом, чтобы при испытаниях воспроизвести влияние температурных условий

окружающей среды на двигатель в течение требуемого срока эксплуатации.

Рассмотренные выше режимы испытаний двигателей попеременным термостатированием и тепловым старением были также реализованы и при проведении эксплуатационных испытаний двигателя 2Ц4Д1 для установления гарантийных сроков в условиях его эксплуатации в составе РН "Циклон-4" во влажном тропическом климатическом районе.

Актуальность проведения работ по продлению сроков эксплуатации РДТТ для РН "Зенит" и "Циклон-4" была обусловлена необходимостью использования имеющегося запаса ранее изготовленных корпусов двигателей, зарядов твердого топлива и воспламенителей. В этих работах при проведении испытаний использовались комплекты узлов как с просроченными допустимыми сроками хранения, так и с недостаточными гарантийными сроками для использования их в двигателях торможения ступеней РН.

Ускоренным испытаниям подвергали как двигатели в целом, так и их составные части: заряды твердого топлива, корпуса с теплозащитным покрытием, уплотнительные резинотехнические детали и другие элементы двигателя. При проведении испытаний использовали корпуса двигателей и заряды твердого топлива различных сроков изготовления, при этом испытания корпусов проводили по режиму теплового старения внутреннего теплозащитного покрытия при температурах от 60 до 70 °С [13]. Для проведения вибрационных и огневых стендовых испытаний двигателя комплектовались корпусами с ТЗП, зарядами и воспламенителями, прошедшими испытания тепловым старением.

Испытаниям тепловым старением подвергались также и отдельные группы РДТТ с различными сроками хранения. Для таких испытаний одну из групп двигателей разбирали на составные части, а другую – не разбирали. Испытания проводили по определенным режимам в течение времени, эквивалентного дополнительному сроку эксплуатации составных частей и двигате-

лей в целом до требуемых значений [14, 17]. Такой метод испытаний исключал перестаривание материалов, имеющих различные значения энергии активации, и позволил приблизить режимы испытаний к реальным условиям эксплуатации двигателей.

Разработанные (изложенные) методические положения могут быть использованы для оценки и установления гарантийных сроков эксплуатации вновь создаваемых РДТТ для ракетно-космических комплексов. Целесообразность использования методик обусловлена тем, что они позволяют получить конкретные данные о работоспособности двигателей в заданных условиях в течение требуемых сроков эксплуатации.

#### **Список использованной литературы**

1. Шапошников В.А. Оценка гарантийных сроков эксплуатации боевых ракет (на этапах проектирования и конструкторской отработки) / В.А. Шапошников, В.Ф. Уткин, Н.М. Беляев. – 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. Опыт работы КБ "Южное" по продлению сроков эксплуатации боевой ракетной техники свыше установленных гарантийных сроков / А.Н. Машенко, Е.И. Шевцов, О.П. Назаренко и др. // 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: ГКБ "Южное", 2004. – Вып. 1. – С. 211-228.
5. Доценко В.М., Оглих В.В., Волков Ю.П. Разработка малогабаритных РДТТ, пороховых аккумуляторов давления и пиротехнических средств для стратегических и космических ракет // Космическая техника. Ракетное вооружение: Сб. науч.-техн. ст. – Днепропетровск: ГКБ "Южное", 2004. – Вып. 1. – С. 229-241.

6. Оглих В.В., Доценко В.М., Вахромов В.А. Особенности экспериментальной отработки малогабаритных РДТТ // Космическая техника. Ракетное вооружение: Сб. науч.-техн. ст. – Днепропетровск: ГП "КБ "Южное", 2011. – Вып. 2. – С. 201-209.

7. Кириченко А.С. Повышение эффективности РДТТ на основе разработки и реализации новых проектно-конструкторских решений ГП "КБ "Южное" / А.С. Кириченко, Б.И. Кушнир, Л.П. Малый и др. // Космическая техника. Ракетное вооружение: Сб. науч.-техн. ст. – Днепропетровск: ГП "КБ "Южное", 2014. – Вып. 1. – С. 89-96.

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

9. Кириченко А.С. Опыт предприятия по отработке, установлению и продлению сроков эксплуатации маршевых ракетных двигателей на твердом топливе / А.С. Кириченко, И.П. Балицкий, В.В. Рогулин и др. // Космическая техника. Ракетное вооружение: Сб. науч.-техн. ст. – Днепропетровск: ГП "КБ "Южное", 2014. – Вып. 2. – С. 16-22.

10. Пат. 69539 Україна, МПК С 06 В 43/00, F42В 39/00. G 01N17/00. Спосіб випробувань виробів з полімерних матеріалів на старіння / М.І. Тутов, А.С. Кириченко, І.П. Баліцький, О.О. Трегубенко, Л.М. Шиман, Є.Б. Устименко, Л.І. Підкаменна (Україна). Заявник та власник ДКБ "Південне", ДП "ВО "Павлоградський хімічний завод". – №2003076704; Заявлено 16.07.2003; Опубл. 10.12.2007, Бюл. №20.

11. Устименко Е.Б., Шиман Л.Н. Утилизация в Украине снаряженных твердым топливом корпусов двигателей МБР РС-22 с истекшими сроками гарантийного хранения // Космическая техника. Ракетное вооружение: Сб. науч.-техн. ст. – Днепропетровск: ГП "КБ "Южное", 2014. – Вып. 2. – С. 43-49.

12. Доценко В.М. Возможность продления эксплуатации специальных РДТТ и

ПАДов – эффект определенных принципов разработки / В.М. Доценко, В.В. Оглих, Э.М. Кокоулин, Ю.П. Волков // Космическая техника. Ракетное вооружение: Сб. науч.-техн. ст. – Днепропетровск: ГП "КБ "Южное", 2006. – Вып. 1-2. – С. 108-113.

13. Тутов Н.И., Чепель Г.Н., Безденежных А.В. О некоторых методах установления и продления сроков эксплуатации РДТТ для ракет-носителей космического назначения // Авиационно-космическая техника и технология: Науч.-техн. журн. – Харьков: ХАИ, 2009. – Вып. 9(66). – С. 116-120.

14. Тутов Н.И. Об особенностях экспериментальной отработки РДТТ при продлении сроков эксплуатации / Н.И. Тутов, Г.Н. Чепель, В.В. Рогулин, А.О. Исаев // Космическая техника. Ракетное вооружение: Сб. науч.-техн. ст. – Днепропетровск: ГП "КБ "Южное", 2013. – Вып. 2. – С. 88-92.

15. Пат. 80174 Україна, МПК G 01 N 3/60, G 01 N 17/00. Спосіб циклічних температурних випробувань виробів / М.І. Тутов, Г.М. Чепель, Л.А. Клименко, Є.С. Рогуліна (Україна). Заявник та власник ДКБ "Південне". – № а 2005 06363; Заявлено 29.06.2005; Опубл. 27.08.2007, Бюл. №13.

16. Пат. 77764 Україна, МПК G 01 N 17/00. Спосіб прискорення випробувань виробів на старіння / М.І. Тутов, Г.М. Чепель, А.С. Кириченко, І.П. Баліцький, А.В. Безденежних, Л.А. Клименко, Є.С. Рогуліна (Україна). Заявник та власник ДКБ "Південне". – №20040907703; Заявлено 22.09.2004; Опубл. 15.01.2007, Бюл. №1.

17. Пат. 47426 Україна, МПК(2009) G 01N 17/00, G 01 N 17/004. Спосіб прискорених випробувань групи виробів з полімерних матеріалів на старіння / М.І. Тутов, Г.М. Чепель, Л.А. Клименко (Україна). Заявник та власник ДКБ "Південне". – №200603723; Заявлено 05.04.2006; Опубл. 10.02.2010, Бюл. №3.

Статья поступила 29.12.2015