

УДК 622.1.9

doi: 10.18698/0536-1044-2019-7-59-65

Новое поколение гидрозащиты погружных электрических двигателей с динамическим лабиринтом для эксплуатации осложненных месторождений с высоким содержанием свободного газа и механических примесей

А.В. Трулев¹, С.Ф. Тимушев²¹ АО «РИМЕРА»² Московский авиационный институт

A New Generation of Submersible Electrical Motor Protectors with a Dynamic Labyrinth for Operation in Aggressive Environment with High Concentration of Free Gas and Solids

A.V. Trulev¹, S.F. Timushev²¹ AO Rimer² Moscow Aviation Institute (National Research University)

Рассмотрены проблемы эксплуатации нефтяных месторождений с помощью установок электрических центробежных насосов. Отмечены негативные факторы, приводящие к возрастанию концентрации механических примесей в верхней части протектора гидрозащиты погружного электрического двигателя (протектора), к увеличению вероятности выхода из строя торцевых уплотнений и уменьшению ресурса серийных изделий. Одним из методов повышения надежности работы гидрозащиты при высоком содержании газа и механических примесей является замена гравитационного лабиринта (установленного в верхней части протектора) динамическим. На основе указанного метода предложена конструкция гидрозащиты, позволяющая существенно увеличить расчетную эффективность сепарации механических примесей (в 300 раз), надежность (так как при установившемся режиме эксплуатации обеспечивается работоспособность даже после выхода из строя торцевых уплотнений) и ремонтпригодность (благодаря меньшему числу деталей), а также снизить монтажную длину (на 25...40 %) и себестоимость изделия. Концептуально новый принцип работы дает возможность создать новое поколение высоконадежных гидрозашит, способных эффективно работать на осложненном фонде скважин. Новые конструкции должны вытеснить все серийные гидрозашиты из традиционных скважин и добавить сегмент рынка из осложненных скважин.

Ключевые слова: протектор гидравлической защиты, погружной электрический двигатель, гравитационный лабиринт, динамический лабиринт, механизированная добыча нефти, мультифазная смесь

In this work, the authors study the problems associated with the operation of oil wells using electric centrifugal pumps. The authors acknowledge the negative factors that lead to an increase in solids concentration in the upper part of the submersible electric motor protectors, higher possibility of end seal failures and shortening of service life of serial products. The

replacement of a gravitational labyrinth by a dynamic one in the upper part of the motor seal protector is one of the ways to improve the reliability of the protector in the operational environment with high concentration of gas and solids. The proposed seal protector design makes it possible to considerably increase the estimated efficiency of solids separation (by 300 times), improve reliability, as stable running is ensured even after the failure of end seals, and reduce the mounting length by 25–40 %, resulting in cost saving and improved maintainability as fewer parts are used. This conceptually new operation principle facilitates the creation of a new generation of highly reliable seal protectors, capable of working effectively in challenging well conditions. Thus, the new design should supersede all serial motor seal protectors in conventional wells and add a market segment in complicated wells.

Keywords: motor seal protector, submersible electric motor, gravitational labyrinth, dynamic labyrinth, artificial oil lift, gas liquid mixture

Эксплуатация скважин с помощью установок электрических центробежных насосов (УЭЦН) является одним из основных механизированных видов добычи нефти. В России таким способом освоено свыше 60000 скважин. Эксплуатация нефтяных месторождений осложнена различными геолого-промысловыми и техногенными факторами. Кроме того, в целях повышения коэффициента извлечения нефти и дебита увеличивают депрессию на пласт и снижают давление в пластовой жидкости (ПЖ) на входе в установку, что вызывает появление механических примесей и свободного газа на приеме УЭЦН.

Для обеспечения эффективной добычи ПЖ из малодебитных скважин УЭЦН работает в периодическом и кратковременном режимах. Это приводит к повышению концентрации механических примесей в верхней части протектора гидравлической защиты (ГЗ) погружного электрического двигателя (ПЭД) за счет того, что во время остановок механические примеси под действием сил гравитации спускаются вниз, к вероятности выхода из строя торцевых уплотнений, к снижению ресурса серийных изделий.

Цель работы — повышение надежности гидравлической защиты ПЭД.

Гидрозащита может состоять из модуля протектора и модуля компенсатора (МК), устанавливаемых соответственно над и под ПЭД [1]. Задача ГЗ — предотвращение попадания ПЖ в масло ПЭД, выравнивание давлений масла ПЭД и ПЖ, передача мощности от двигателя к насосу.

Условия эксплуатации и требования к надежности нефтяного оборудования постоянно ужесточаются. Например, одной УЭЦН планируется одновременно добывать нефть из двух и более пластов [2], при высоком содержании свободного

газа и механических примесей [3, 4], с насосами в компрессионном исполнении [5].

Существует большое разнообразие конструкций ГЗ российского и зарубежного производства. Однако до сих пор не выработана единая концепция оптимального конструктивного варианта ГЗ. Это обстоятельство заметно усложняет работу сервисных служб и ремонтных баз, так как эксплуатация и ремонт каждого типа гидрозащиты имеет свои технологические особенности [6].

Серийные ГЗ имеют следующие недостатки [7–10]. Диафрагма протектора проницаема для газов. Некоторые газы (например, сероводород H_2S и углекислый газ CO_2) способны образовывать химические соединения с маслом ПЭД, снижая его физические свойства [11]. Также могут появиться кислоты, вызывающие коррозию элементов двигателя, продукты которой снижают ресурс подшипников.

Чтобы предотвратить попадание ПЖ через уплотнение в масло ПЭД, необходимо обеспечить гарантированный положительный перепад давления между маслом двигателя и ПЖ [12]. В противном случае, даже если гидрозащита останется в рабочем состоянии, ПЭД может выйти из строя.

Верхняя часть серийной ГЗ (рис. 1) содержит модуль гравитационного лабиринта (ГЛ) 5 (длинной около 1 м), который может иметь одно или два торцевых уплотнения 2. При выходе из строя одного из них другое осуществляет защиту модуля, но оба уплотнения являются подвижными и работают в неблагоприятных условиях. Сверху уплотнение 2 укомплектовано отбойником 1 для защиты от механических примесей. Однако это не исключает контакта масла ПЭД с ПЖ и твердыми частицами малого диаметра [13–15].

Современным отечественным маслом, используемым в ПЭД и ГЛ гидрозащиты, является

ся масло МДПН, представляющее собой полусинтетическую основу с добавками. Также применяют синтетические масла REDA-5 и Shell Fluid 4600. Плотность масла находится в пределах 850...985 кг/м³ [1].

При добыче многокомпонентной ПЖ значения плотностей масла в ГЛ и компонентов нефти являются соизмеримыми [16]. В этих условиях существующие лабиринты не могут обеспечить надежной защиты, так как компоненты масла и пластовых флюидов в ГЛ будут смешиваться, образуя сложные дисперсные системы, содержащие газ, жидкости и твердые частицы.

Торцевые уплотнения 2 и 6 ГЛ и МК с компенсирующим элементом в виде поршня или диафрагмы гидравлически связаны с затрубным пространством и МК. Поэтому при спуске УЭЦН в скважину, пуске и остановке ПЭД, при температурном изменении объема масла в двигателе изменяется форма диафрагмы или положение поршня в МК гидрозакриты, выравниваются давления внутри ПЭД и в затрубном пространстве.

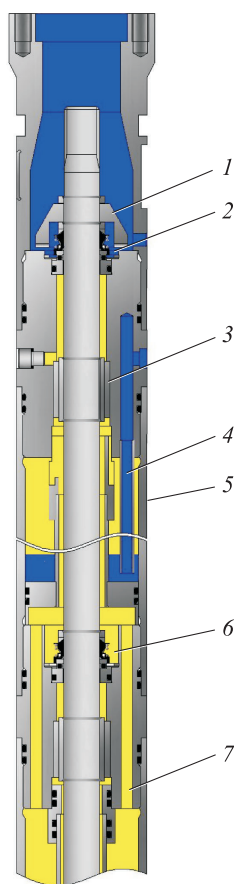


Рис. 1. Эскиз верхней части серийной ГЗ:

1 — отбойник; 2 и 6 — торцевые уплотнения ГЛ и МК; 3 — подшипник; 4 — трубка для подвода ПЖ; 5 — модуль ГЛ; 7 — канал в МК; ■ — масло ПЭД; ■ — ПЖ

В лабиринт затекает из затрубного пространства ПЖ в объеме около 10 % объема масла в двигателе, что может составлять около 50 % объема ГЛ.

При этом компоненты ПЖ могут попадать в область торцевых уплотнений 2, 6 и подшипника 3, снижая ресурс этих элементов. Через канал 7 они способны проникнуть в МК, вызвать коррозию на внутреннем диаметре корпуса поршневого модуля и отложение соли, привести к заклиниванию поршня.

Предлагаемая конструкция верхней части ГЗ с динамическим лабиринтом (ДЛ), приведенная на рис. 2, устраняет указанные недостатки.

В состав ДЛ 3, входит динамическая втулка в форме колокола для защиты торцевого уплотнения 5. Между валом 1 и втулкой установлено неподвижное уплотнение 2, которое, в отличие от подвижных торцевых уплотнений серийной ГЗ, износу не подлежит [17].

Динамический лабиринт обеспечивает длительную работу УЭЦН даже при выходе из строя торцевого уплотнения МК поршневого или диафрагменного типа. Благодаря газовой области, образуемой в верхней части лабиринта, устраняется возможность проникновения ионов соли из ПЖ в масло ПЭД [18, 19]. Это подтверждено результатами опытно-промышленных испытаний (ОПИ), проведенных в ООО «РН-Пурнефтегаз», где УЭЦН работала с обратным клапаном, который не закрылся при заправке двигателя маслом до спуска в скважину более двух месяцев. При этом износа деталей ДЛ не выявлено.

Расчеты показывают, что применение динамической втулки (верхнего газового колокола) в ГЗ с ДЛ (см. рис. 2) обеспечивает в 300 раз большую эффективность сепарации механических примесей, чем ГЗ с традиционным ГЛ (см. рис. 1). Это связано с тем, что центробежное ускорение, определяющее градиент давления, в 300 раз превышает ускорение свободного падения. Градиент давления

$$\frac{\partial p}{\partial R} = \rho \frac{U_L^2}{R},$$

где p — давление; R — радиус динамической втулки; ρ — плотность мультифазной смеси; U_L — окружная скорость ДЛ.

Аналогичным образом работают погружные сепараторы механических примесей [20].

Высокий градиент давления приводит к эффективной сепарации пузырьков газа из ПЖ внутрь колокола и к удалению из него твердых

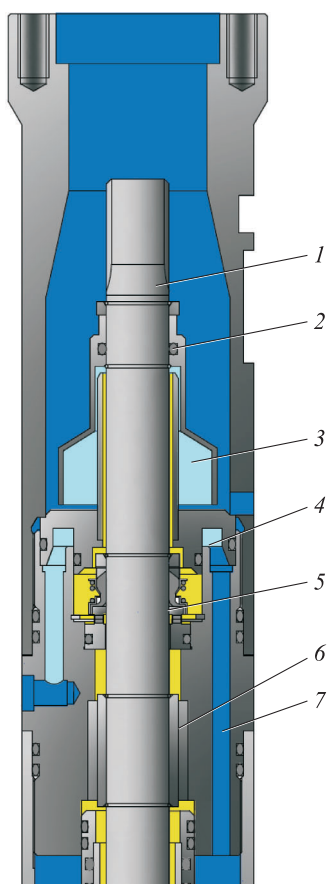


Рис. 2. Эскиз верхней части новой ГЗ с ДЛ:

1 — вал; 2 — уплотнение; 3 — динамический лабиринт;
4 — нижний газовый колокол; 5 — торцевое уплотнение;
6 — подшипник; 7 — канал входа ПЖ в компенсирующий
модуль; ■ — газ; ■ — масло ПЭД; ■ — ПЖ

частичек кварцевого песка. Вследствие образования газовой области в верхнем ДЛ торцевое уплотнение 3 (см. рис. 2) отделено не только от механических примесей, но и от ПЖ.

Торцевое уплотнение 3 работает в замкнутой масляной области и гидравлически не связано с компенсирующим элементом. Поэтому при спуске УЭЦН, пуске и остановке ПЭД через торцевое уплотнение 3 и подшипник 4 не про-

текает жидкость, контактирующая с затрубным пространством, которая может содержать механические примеси. При замене гравитационного лабиринта динамическим монтажная длина ГЗ падает на 20...40% относительно таковой для серийных аналогов. Вследствие меньшего числа деталей снижаются себестоимость и стоимость ремонта ГЗ.

При наличии насосного устройства, обеспечивающего положительный перепад давления между маслом и ПЖ в районе торцевого уплотнения, компенсирующий элемент может быть установлен в МК под ПЭД. В этом случае конструкция гидрозащиты упростится еще больше, а стоимость снизится благодаря отсутствию вала для передачи мощности от двигателя к насосу, который в серийных ГЗ проходит через протектор. Также уменьшится усилие, необходимое для страгивания поршня, поскольку он будет двигаться только по внутреннему диаметру корпуса МК.

Опытные образцы ГЗ успешно прошли ОПИ в НК «Белкам нефть». Разработка передана в серийное производство.

Выводы

1. Предложена конструкция ГЗ поршневого или диафрагменного типа с ДЛ для защиты торцевого уплотнения МК.

2. В конструкции ГЗ диафрагменного типа отсутствует ГЛ, благодаря чему снижаются монтажная высота (на 20...40%), себестоимость изделия и затраты на ремонт (вследствие меньшего числа деталей).

3. При наличии насосного устройства, обеспечивающего положительный перепад давления между маслом и ПЖ в районе торцевого уплотнения, компенсирующий элемент может быть установлен в МК под ПЭД.

Литература

- [1] Агеев Ш.Р. *Российские установки лопастных насосов для добычи нефти и их применение. Энциклопедический справочник.* Пермь, Пресс-Мастер, 2007. 645 с.
- [2] Трулев А.В. Универсальное устройство для ОРЭ пластов с высоким содержанием свободного газа и механических примесей. *Инженерная практика*, 2013, № 3, с. 74–77.
- [3] Трулев А.В., Сабиров А.А., Сибирев С.В. Новое оборудование ЗАО «Римера» для эксплуатации скважин с высоким содержанием свободного газа и механических примесей. *Нефтегазовая Вертикаль*, 2014, № 16, с. 28–30.
- [4] Трулев А.В. Новые погружные центробежные насосы со ступенями из серого чугуна в двухпорном исполнении. *Инженерная практика*, 2017, № 5, с. 74–76.

- [5] Трулев А.В. Новое оборудование ОАО «Алнас» для скважин с осложненными условиями эксплуатации. *Инженерная практика*, 2015, № 12, с. 71–73.
- [6] Трулев А.В., Шестакова С.Б., Зязева Т.Ю., Аристов Б.В., Яхин И.Н. Новое поколение гидрозавит для эксплуатации в осложненных месторождениях. *Нефтегазовая Вертикаль*, 2014, № 20, с. 44–47.
- [7] Емцев Б.Т. *Техническая гидромеханика*. Москва, Машиностроение, 1987. 440 с.
- [8] Пятов И.С. Возможности совершенствования протекторов электроприводов УЭЦН. *Нефть и Газ Евразия*, 2006, № 6, с. 6–8.
- [9] Пятов И.С. Гидрозащиты электроприводов погружных насосов для особо сложных условий нефтедобычи. *Offshore Europe*, 2007, № 2, с. 48–50.
- [10] Пятов И.С. Поршневые протекторы для гидрозащиты электроприводов погружных насосов. *Offshore Europe*, 2007, № 3, с. 7–8.
- [11] Маркин А.Н., Низамов Р.Э., Суховерхов С.В. *Нефтепромысловая химия: практическое руководство*. Владивосток, Дальнаука, 2012. 288 с.
- [12] Голубев А.И. *Уплотнения и уплотнительная техника*. Москва, Машиностроение, 1986. 464 с.
- [13] Трулев А.В., Шестакова С.Б., Леонов В.В. *Устройство для гидравлической защиты погружного маслозаполненного электродвигателя (варианты)*. Патент № 2670291 РФ, бюл. № 30, 2018.
- [14] Трулев А.В., Ложкина И.Н., Леонов В.В. *Устройство для гидравлической защиты погружного маслозаполненного электродвигателя*. Патент № РФ 2670290, бюл. № 30, 2018.
- [15] Трулев А.В., Леонов В.В. *Устройство для гидравлической защиты погружного маслозаполненного электродвигателя*. Патент № 2645106 РФ, бюл. № 5, 2018.
- [16] Барсукова В.В., Домиденко К.А., Крылова С.М. *Нефти и газовые конденсаты России. Справочник. Т. 2. Нефти Сибири*. Москва, Техника, 2002. 160 с.
- [17] Трулев А.В., Сабиров А.А., Вербицкий В.С., Тимушев С.Ф. Погружные УЭЦН с широкими каналами в проточной части для добычи пластовой жидкости из малодебитных скважин с высоким содержанием механических примесей. *Инженерная практика*, 2017, № 1–2, с. 60–63.
- [18] Трулев А.В., Сабиров А.А., Сибирев С.В., Вербицкий В.С., Сидоренко А.В. Новое оборудование ЗАО «Римера» для скважин с осложненными условиями эксплуатации. *Нефтегазовая Вертикаль*, 2015, № 17–18, с. 118–121.
- [19] Трулев А.В. Погружная УЭЦН нового поколения. Инновационные решения для борьбы с осложнениями на малодебитном фонде. *Oil and Gas Journal Russia*, 2017, № 4, с. 30–34.
- [20] Трулев А.В., Грачев В.В. Стендовые испытания погружного сепаратора газа и механических примесей на модельных смесях. *Газовая промышленность*, 2018, № 8, с. 20–24.

References

- [1] Ageev Sh.R. *Rossiyskie ustanovki lopastnykh nasosov dlya dobychi nefti i ikh primeneniye. Ehntsiklopedicheskiy spravochnik* [Russian installations of blade pumps for oil production and their application. Encyclopedic reference]. Perm, Press-Master publ., 2007. 645 p.
- [2] Trulev A.V. Universal device for the wholesale electricity market with high content of free gas and mechanical impurities. *Inzhenernaya praktika*, 2013, no. 3, pp. 74–77 (in Russ.).
- [3] Trulev A.V., Sabirov A.A., Sibirev S.V. New equipment of CJSC Rимера for operation of wells with a high content of free gas and mechanical impurities. *Neftgazovaya Vertikal'*, 2014, no. 16, pp. 28–30 (in Russ.).
- [4] Trulev A.V. New submersible centrifugal pumps with gray cast iron steps in double-bearing design. *Inzhenernaya praktika*, 2017, no. 5, pp. 74–76 (in Russ.).
- [5] Trulev A.V. New equipment of JSC “Alnas” for wells with complicated operating conditions. *Inzhenernaya praktika*, 2015, no. 12, pp. 71–73 (in Russ.).

- [6] Trulev A.V., Shestakova S.B., Zyazeva T.Yu., Aristov B.V., Yakhin I.N. A new generation of hydroprotection for exploitation in complicated fields. *Neftegazovaya Vertikal'*, 2014, no. 20, pp. 44–47 (in Russ.).
- [7] Emtsev B.T. *Tekhnicheskaya gidromekhanika* [Technical fluid mechanics]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1987. 440 p.
- [8] Pyatov I.S. Opportunities for the improvement of electric protectors. ESP. *Oil and Gas. Eurasia*, 2006, no. 6, pp. 6–8.
- [9] Pyatov I.S. Hydraulic protection of electric drives of submersible pumps for especially difficult conditions of oil production. *Offshore Europe*, 2007, no. 2, pp. 48–50.
- [10] Pyatov I.S. Piston protectors for hydraulic protection of electric drives for submersible pumps. *Offshore Europe*, 2007, no. 3, pp. 7–8.
- [11] Markin A.N., Nizamov R.Eh., Sukhoverkhov S.V. *Neftepromyslovaya khimiya: prakticheskoe rukovodstvo* [Oilfield Chemistry: A Practical Guide]. Vladivostok, Dal'nauka publ., 2012. 288 p.
- [12] Golubev A.I. *Uplotneniya i uplotnitel'naya tekhnika* [Seals and sealing technology]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1986. 464 p.
- [13] Trulev A.V., Shestakova S.B., Leonov V.V. *Ustroystvo dlya gidravlicheskoj zashchity pogruzhnogo maslo zapolnennogo ehlektrodivigatelya (varianty)* [Device for hydraulic protection of a submersible oil filled motor (options)]. Patent RF no. 2670291, 2018.
- [14] Trulev A.V., Lozhkina I.N., Leonov V.V. *Ustroystvo dlya gidravlicheskoj zashchity pogruzhnogo maslo zapolnennogo ehlektrodivigatelya* [Device for hydraulic protection of a submersible oil filled motor]. Patent RF no. 2670290, 2017.
- [15] Trulev A.V., Leonov V.V. *Ustroystvo dlya gidravlicheskoj zashchity pogruzhnogo maslonapolnennogo ehlektrodivigatelya* [Device for hydraulic protection of submersible oil-filled electric motor]. Patent RF no. 2645106, 2018.
- [16] Barsukova V.V., Domidenko K.A., Krylova S.M. *Nefti i gazovye kondensaty Rossii. Spravochnik. T. 2. Nefti Sibiri* [Oil and gas condensates of Russia. Directory. Vol. 2. Siberian oil]. Moscow, Tekhnika publ., 2002. 160 p.
- [17] Trulev A.V., Sabirov A.A., Verbitskiy V.S., Timushev S.F. Submersible ESP systems with wide channels in the flow section for the extraction of formation fluid from marginal wells with a high content of mechanical impurities. *Inzhenernaya praktika*, 2017, № 1–2, pp. 60–63 (in Russ.).
- [18] Trulev A.V., Sabirov A.A., Sibirev S.V., Verbitskiy S.V., Sidorenko A.V. New equipment of CJSC Rimera for wells with complicated operating conditions. *Neftegazovaya Vertikal'*, 2015, no. 17–18, pp. 118–121 (in Russ.).
- [19] Trulev A.V. Submersible ESP new generation. Innovative solutions to combat the complications of the low-yield fund. *Oil and Gas Journal Russia*, 2017, no. 4, pp. 30–34 (in Russ.).
- [20] Trulev A.V., Grachev V.V. Bench tests of a submersible separator of gas and mechanical impurities on model mixtures. *Gazovaya promyshlennost'*, 2018, no. 8, pp. 20–24 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 14.03.2019

Информация об авторах

ТРУЛЕВ Алексей Владимирович — кандидат технических наук. АО «Римера» (125047, Москва, Российская Федерация, ул. Лесная, д. 5, корп. Б, e-mail: aleksey.trulev@rimera.com).

ТИМУШЕВ Сергей Федорович — доктор технических наук. Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (125993, Москва, Российская Федерация, Волоколамское ш., д. 4, e-mail: irico.harmony@gmail.com).

Information about the authors

TRULEV Aleksei Vladimirovich — Candidate of Science (Eng.). AO Rimera (125047, Moscow, Russian Federation, Lesnaya St., Bldg. 5, Block B, e-mail: aleksey.trulev@rimera.com).

TIMUSHEV Sergei Fedorovich — Doctor of Science (Eng.). Moscow Aviation Institute (National Research University) (125993, Moscow, Russian Federation, Volokolamskoye Shosse, Bldg. 4, e-mail: irico.harmony@gmail.com).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Трулев А.В., Тимушев С.Ф. Новое поколение гидрозщиты погружных электрических двигателей с динамическим лабиринтом для эксплуатации осложненных месторождений с высоким содержанием свободного газа и механических примесей. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2019, № 7, с. 59–65, doi: 10.18698/0536-1044-2019-7-59-65

Please cite this article in English as:

Trulev A.V., Timushev S.F. New Generation of SEM Protector with Dynamic Labyrinth for Operation in Aggressive Environment with High Concentration of Free Gas and Solids. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2019, no. 7, pp. 59–65, doi: 10.18698/0536-1044-2019-7-59-65



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет учебное пособие

Под редакцией В.А. Сорокина, Д.А. Ягодникова

«Технология производства ракетно-прямоточных двигателей на твердом топливе»

Изложены основы технологии изготовления ракетно-прямоточных двигателей на твердом топливе (РПДТ). Приведена классификация характеристик режимов работы отдельных агрегатов и РПДТ в целом, а также действующих на них силовых и тепловых нагрузок, обуславливающих выбор функциональных конструкционных материалов. Представлены данные о физико-механических и теплофизических свойствах металлических и композиционных конструкционных материалов, используемых при изготовлении элементов конструкции РПДТ. Рассмотрены основные технологические процессы и операции формообразования деталей, в том числе инновационные, и показаны примеры внедрения в конструирование и технологию изготовления РПДТ систем автоматизированного проектирования.

В учебном пособии использованы материалы научно-исследовательских работ, выполняемых в МГТУ им. Н.Э. Баумана, МАИ, ИПХФ РАН, а также данные зарубежных научных периодических изданий. Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки бакалавров и магистров «Авиационная и ракетно-космическая техника», специальности «Проектирование авиационных и ракетных двигателей» направления подготовки дипломированных специалистов «Двигатели летательных аппаратов», а также для инженеров, работающих в области ракетно-космической техники.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;

press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru