

РАСЧЕТ ТОЛЩИНЫ СТЕНКИ КОРПУСА КОМПРЕССОМЕТРА, ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОЙ 3D ПЕЧАТИ

Терентьев В. В., Смирнов С. Ф.

Терентьев Владимир Викторович (ORCID 0000-0002-9189-8076)

ФГБОУ ВО «Ивановская государственная сельскохозяйственная академия имени Д.К. Беляева»,
г. Иваново, Россия. 153012, Ивановская область, г. Иваново, ул. Советская, д. 45.

E-mail: vladim-terent@yandex.ru

Смирнов Станислав Федорович

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»,
г. Иваново, Россия. 153003, Ивановская область, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34

E-mail: smirnovst55@gmail.com

Эффективность работы двигателя внутреннего сгорания зависит от многих характеристик, из которых одной из важнейших является компрессия двигателя - давление топливно-воздушной смеси в камере сгорания на заключительной стадии такта сжатия. Она позволяет определить техническое состояние цилиндропоршневой группы и оценить правильность регулировок различных систем двигателя. Для измерения компрессии служит компрессометр — прибор для измерения компрессии в цилиндрах двигателей внутреннего сгорания. Рассмотрена задача по определению толщины стенки корпуса компрессометра, представляющего полую призму с постоянной толщиной стенки при действии максимального давления 4,053 МПа, входящего в разработанный прибор диагностики двигателей внутреннего сгорания, выполненного из пластика PETG путем послойной 3D печати. Для расчета на прочность экспериментальным путем на разрывной машине определена величина допускаемого напряжения для пластика PETG, не имеющего явного предела текучести. Предложены расчетная модель корпуса компрессометра, находящегося под действием внутреннего давления и аналитические выражения для наибольших внутренних усилий в стенке, разработана геометрическая модель корпуса компрессометра в программном комплексе Ansys Workbench с учетом механических характеристик пластика для расчета механических напряжений в корпусе. Расхождение наибольших эквивалентных напряжений при аналитическом и численном методах расчета не превышают 6,5 %. Проведен расчет толщины стенки, которая составила 9 мм, исходя из обоих методов расчета эквивалентных напряжений из условия прочности для пластмасс.

Ключевые слова: компрессия, давление, корпус, механическое напряжение, пластик PETG, допускаемое напряжение, условие прочности, толщина стенки, аналитический расчет, численный расчет.

CALCULATION OF THE WALL THICKNESS OF THE COMPRESSOMETER HOUSING WHICH IS RECEIVED BY LAYER-BY-LAYER 3D PRINTING

Terentyev V. V., Smirnov S. F.

Terentyev Vladimir Viktorovich (ORCID 0000-0002-9189-8076)

FSBEI HE "Ivanovo State Agricultural Academy named after D.K. Belyaeva",
Ivanovo, Russia. 153012, Ivanovo region, Ivanovo, st. Sovetskaya, 45.

E-mail: vladim-terent@yandex.ru

Smirnov Stanislav Fedorovich

FGBOU VO "Ivanovo State Power Engineering University. IN AND. Lenin,
Ivanovo, Russia. 153003, Ivanovo region, Ivanovo, st. Rabfakovskaya, 34

E-mail: smirnovst55@gmail.com

The efficiency work of the internal combustion engine depends on many characteristics, of which one of the most important is the compression of the engine - the pressure of the fuel-air mixture in the combustion chamber at the final stage of the compression stroke. It allows you to determine the technical condition of the cylinder-piston group and assess the correctness of the adjustments of various engine systems. A compressometer is used to measure compression — a device for measuring compression in the cylinders of internal combustion engines. The problem of determining the wall thickness of the compressometer housing, which is a hollow prism with a constant wall thickness under the action of a maximum pressure of 4,053 MPa, included in the developed internal combustion engine diagnostic device made of PETG plastic by layer-by-layer 3D printing, is considered. For strength calculation experimentally ways on a bursting machine the value of the allowable stress for PETG plastic, which does not have an explicit yield strength, is defined. A computational model of the compressometer housing under the influence of internal pressure and analytical expressions for the greatest internal forces in the wall are proposed, a geometric model of the compressometer housing in the Ansys Workbench software package is developed, taking into account the mechanical characteristics of plastic for calculating mechanical stresses in the housing. The discrepancy of the largest equivalent stresses with analytical and numerical calculation methods does not exceed 6,5%. The calculation of the wall thickness, which was 9 mm, was carried out, based on both calculation methods equivalent stresses from the strength condition for plastics.

Keywords: compression, pressure, housing, mechanical stress, PETG plastic, allowable stress, strength condition, wall thickness, analytical calculation, numerical calculation.

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

Современное оборудование сельскохозяйственного производства эксплуатируется в сложных условиях, отличающихся рядом характерных особенностей [1].

Высокие нагрузки, действующие на элементы автотракторной и сельскохозяйственной техники, приводят к значительному их износу, а также снижению их ресурса [2].

Одной из актуальных проблем при использовании технических средств в современном сельскохозяйственном производстве является обеспечение длительного ресурса машин и оборудования при минимальных затратах средств на мероприятия технической эксплуатации [3].

При этом техника должна качественно выполнять возложенные на нее функции максимально длительный период времени [4]. Основу технического потенциала любого сельскохозяйственного товаропроизводителя составляют тракторы, комбайны и автомобили, оснащенные двигателями внутреннего сгорания.

Эффективность работы двигателя внутреннего сгорания зависит от множества характеристик, из которых одной из важнейших является компрессия двигателя - давление топливно-воздушной смеси в камере сгорания на завершающем этапе такта сжатия. От величины компрессии напрямую зависит возможность запуска двигателя, его мощность и т.д.

Компрессия напрямую зависит от эффективности функционирования ряда узлов и систем двигателя. Метод измерения компрессии наибо-

лее широко применяется в настоящее время для диагностирования цилиндропоршневой группы, техническое состояние которой определяет работоспособность всего двигателя и необходимость проведения его капитального ремонта.

Измерение компрессии позволяет определить техническое состояние цилиндропоршневой группы и оценить правильность регулировок различных систем двигателя. Для измерения компрессии служит компрессометр — прибор для измерения компрессии в цилиндрах двигателей внутреннего сгорания.

На кафедре технического сервиса и механики Ивановской ГСХА разработана конструкция универсального прибора для диагностирования дизельных и бензиновых двигателей, в устройство которого входит компрессометр. Так как величина давления в конце такта сжатия для большинства дизельных автомобильных и тракторных двигателей не превышает 35-40 атм, то давление в корпусе прибора не превышает 40 атм. = 4,053 МПа. Внешний вид прибора представлен на рис. 1.

Давление к манометру от камеры сгорания передается через полый прямоугольный корпус в виде полой призмы, изготовленный из пластика PETG путем послойной 3D печати.

Для обеспечения высокой надежности деталей машин на этапе их проектирования проводятся соответствующие прочностные расчеты [5].

Так как пластик PETG не имеет явный предел текучести, то при проектировании предварительно необходимо определить величину допускаемого напряжения для пластика PETG.



Рис.1. Прибор для диагностики двигателей
Fig. 1. Device for engine diagnostics



Рис.2. Разрывная машина УТС-111.2-5-22
Fig.2. Tearing machine UTS-111.2-5-22

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальное определение механических характеристик материала PETG проводилось на универсальной испытательной разрывной машине УТС-111.2-5-22 (рис.2).

Определение механических характеристик проводилось на 5 образцах, напечатанных на 3D принтере для пластмасс при испытании на растяжение в соответствии с требованиями ГОСТ [6].

Форма и размеры образцов указаны на (рис. 3) и в (табл. 1). Первоначально толщина стенки определялась аналитическим методом расчета по допускаемым напряжениям. При этом должны выполняться условия:

$$\sigma_{\text{экв}} \leq \sigma_{\text{adm}}, \quad \sigma_{\text{adm}} \leq \sigma_{\text{пу}}, \quad (1)$$

где $\sigma_{\text{экв}}$ – эквивалентное напряжение;

σ_{adm} – допустимое напряжение;
 $\sigma_{\text{пу}}$ – предел упругости, то есть материал должен работать в упругой области и восстанавливать свои размеры после снятия нагрузки.

При расчете изделий из пластмасс допускаемое напряжение не должно превышать, половину предела текучести или условного предела текучести, определяемого для материала, не имеющего явного предела текучести [7]:

$$\sigma_{\text{adm}} \leq \frac{1}{2} \bar{\sigma}_{\text{пту}}. \quad (2)$$

Предел прочности определялся на основе экспериментальных данных, полученных на разрывной машине для напечатанных методом послойной 3D печати образцов из пластика PETG.

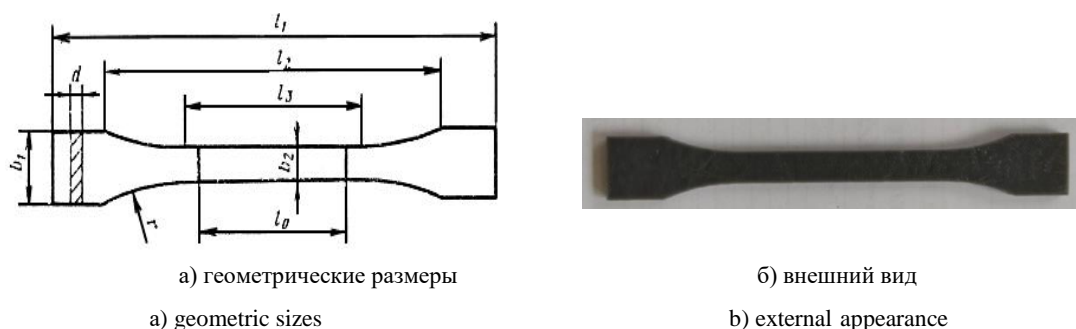


Рис. 3. Образец для испытаний на растяжение
Fig. 3. Tensile test sample

Таблица 1.

Параметры образца для экспериментальных испытаний
Table 1. Sample parameters for experimental tests

Параметр	Размеры образца, мм
Общая длина l1, не менее	150
Расстояние между метками, определяющими положение кромок зажимов на образце, l2	115±2
Длина рабочей части, l3	70±0,5
Расчетная длина, l0	50±0,5
Ширина головки, b1	20±0,5
Ширина рабочей части, b2	10,0
Толщина, d	4,0
Радиус закругления r, не менее	60

Условный предел текучести для каждого образца рассчитывался по [6]. По результатам исследований и расчетов среднее значение по всем

образцам составило $\sigma_{пту} = 50,2 \pm 1,4$ МПа, следовательно, принимаем:

$$\sigma_{adm} \leq \frac{1}{2} \bar{\sigma}_{пту} = 25,0 \text{ МПа.}$$

Корпус компрессометра состоит из полой прямоугольной призмы со сторонами: длиной $a = 70$ мм, шириной $b = 29$ мм, высотой $c = 28$ мм, толщиной стенки корпуса h , которую необходимо определить из условий прочности и находящейся под действием давления $q = 40$ атм $= 4,053$ МПа, модуль упругости $E = 2,01$ МПа [8].

Для определения усилий, действующих в корпусе принимаем расчетную модель, в которой каждую стенку корпуса можно рассматривать как жестко защемленную пластину в которой возникают изгибающие моменты и находящейся под действием продольных сил от внутреннего давления. Расчетная модель корпуса представлена на рис. 4.

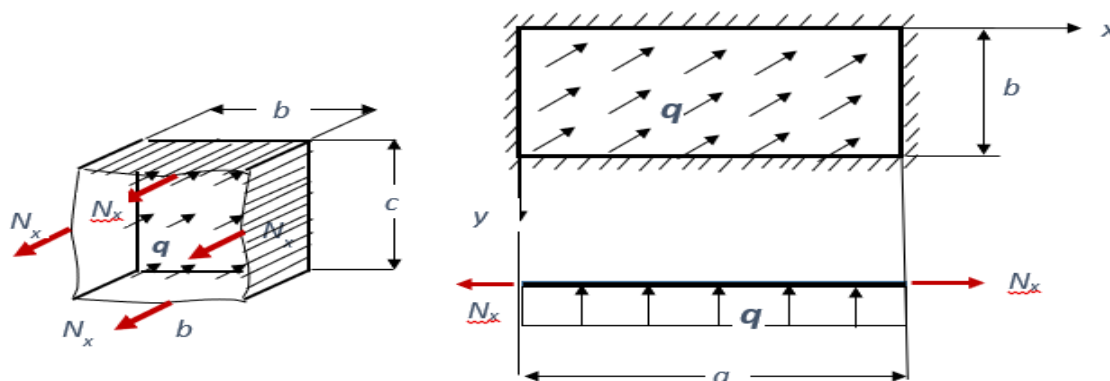


Рис. 4. Расчетная модель корпуса компрессометра
Fig. 4. Estimated model of the compressor housing

Определим продольные силы. Для этого рассматриваются два взаимно-нормальных сечения корпуса и, применяя к ним условия равновесия, определяются продольные силы N_x и N_y , приходящиеся на метр длины (рис.4).

$$N_x = \frac{qbc}{2(b+c)}; N_y = \frac{qac}{2(a+c)}. \quad (3)$$

Изгибающие моменты в пластине определяются из выражений [9]:

$$\begin{aligned} M_x &= -D \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right), \\ M_y &= -D \left(\nu \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

где $D = \frac{Eh^3}{12 \cdot (1-\nu^2)}$ – цилиндрическая жесткость пластины,

h – толщина стенки корпуса,

ν – коэффициент Пуассона,

$w=w(x,y)$ – прогиб в произвольной точке пластины (x,y) . $M_y = -D \left(\nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)$.

Для расчета прогибов $w=w(x, y)$ в пластине от внешней равномерно распределенной нагрузки $q(x,y)$ применяется дифференциальное уравнение Софи – Жермен;

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{q(x,y)}{D} \quad (5)$$

Для жестко закрепленной по контуру пластины (рис.4) при равномерно распределенной нагрузке q воспользуемся результатами [9] при коэффициенте Пуассона $\nu=0,3$, так как коэффициент Пуассона для пластиков, включая PETG, на основании исследований в физике полимеров [10] составляет $\nu > 0,3$.

Таким образом, в стенке возникают нормальные напряжения от изгиба и от продольных сил, действующих в двух взаимно-нормальных направлениях, т.е. в пластине имеет место плоское напряженное состояние с напряжениями σ_x и σ_y [9]:

$$\sigma_x = \frac{N_x}{h} + \frac{6M_x}{h^2}; \quad \sigma_y = \frac{N_y}{h} + \frac{6M_y}{h^2}. \quad (6)$$

Таблица 2.

Прогибы и изгибающие моменты
Table 2. Deflections and bending moments

$\frac{a}{b}$	(w) $x = \frac{a}{2},$ $y = \frac{b}{2},$	(M_y) $y = b,$ $x = \frac{a}{2},$	(M_x) $y = \frac{b}{2},$ $x = 0$	(M_y) $x = \frac{a}{2},$ $y = \frac{b}{2}$	(M_x) $x = \frac{a}{2},$ $y = \frac{b}{2}$
22,0	$0,00254qb^4/D$	$-0,0829qb^2$	$-0,0571qb^2$	$0,0412qb^2$	$0,0158qb^2$
∞	$0,00260qb^4/D$	$-0,0833qb^2$	$-0,0571qb^2$	$0,0417qb^2$	$0,0125qb^2$

Условие прочности для плоского напряженного состояния по 4 теории прочности имеет вид [11]:

$$\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2} \leq \sigma_{adm}, \quad (7)$$

где $\sigma_1 = \sigma_x; \sigma_2 = \sigma_y$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для рассматриваемой в работе пластины

со сторонами $a=70, b= 29$ мм отношение $\left(\frac{a}{b}\right) = 2,41 > 2$ и, следовательно, из таблицы получаем значение наибольшего изгибающего момента на ребре широкой грани:

$$M_y = 0,0833qb^2 = 0,0833 \cdot 4,053 \cdot 10^6 \cdot 841 \cdot 10^{-6} = 283,9 \text{ Нм.}$$

Из уравнения (3) N_x и N_y будут равны:

$$N_x = \frac{4,053 \cdot 0,029 \cdot 0,028}{2(0,029 + 0,028)} = 28,87 \text{ кН/м}; \quad N_y = \frac{4,053 \cdot 0,07 \cdot 0,028}{2(0,07 + 0,028)} = 40,5 \text{ кН/м}$$

Исходя из полученного выше значения $\sigma_{adm} = 25,0$ МПа из (7):

$$\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{\left(\frac{28870}{h}\right)^2 + \left(\frac{40500}{h} + \frac{6 \cdot 283,9}{h^2}\right)^2 - \left(\frac{28870}{h} \cdot \left(\frac{40500}{h} + \frac{6 \cdot 283,9}{h^2}\right)\right)} \leq 25,0 \text{ МПа}$$

численным методом была рассчитана толщина стенки $h=9,0$ мм при давлении смеси $q = 40 \text{ атм} = 4,05 \text{ МПа}$, для которой выполняется условие прочности $\sigma_{\text{экв}} = 24,4 < 25,0 \text{ МПа}$.

Эта величина толщины стенки $h=9,0$ мм и была принята в качестве предположительной расчетной толщины стенки корпуса компрессометра.

Также после расчета аналитическим методом толщина стенки определялась численным методом.

Для расчета толщины стенки численным методом был применен программный комплекс Ansys Workbench. Для расчета была создана модель созданной стенки корпуса. Для этого в блоке «Static Structural» - «Engineering Data» вводятся механические характеристики материала, в «Geometry» строится геометрическая модель и в

«Model» - «Modal» задается внутренне давление.

Предварительно была проведена верификация сетки элементов разбиения, которая составила 41089 элементов, размер элемента при этом разбиении равен 0,75 мм. Были проведены расчеты перемещений и напряжений при исходных данных: $h=9\text{мм}$; $q=4,053\text{МПа}$; $\nu=0,3$; $E=2,01\text{ГПа}$. Результаты расчета приведены на рис. 5, 6.

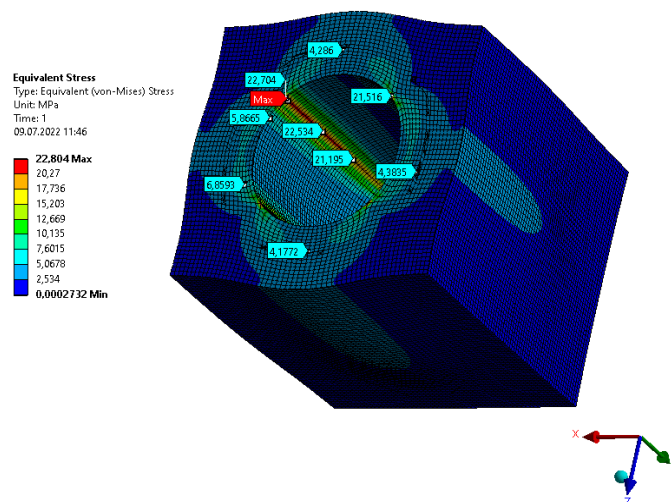


Рис. 5. Напряжения в разрезанной модели
Fig. 5. Stresses in the model cut

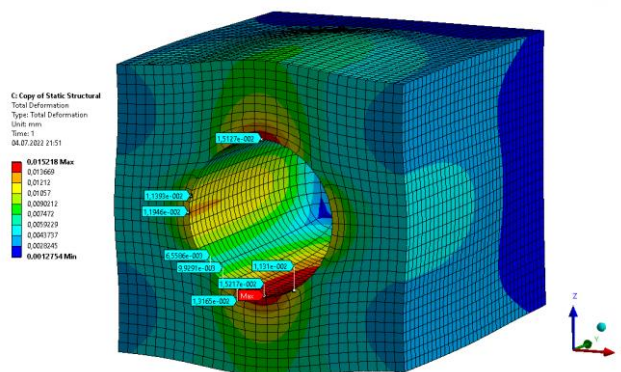


Рис.6. Перемещения в разрезанной модели
Fig. 6. Movements in the model cut

Расчет показал, что наибольшие эквивалентные напряжения при аналитическом методе ($\sigma_{\text{ЭКВ}} = 24,4 \text{ МПа}$) и численном методе ($\sigma_{\text{ЭКВ}} = 22,8 \text{ МПа}$) дают близкие результаты напряжений. Расхождение составляет 6,5% при толщине стенки $h = 9\text{мм}$.

Таким образом, на основании аналитического и численного расчетов при выполнении условия прочности для полимерных материалов,

окончательно, минимальная толщина стенки компрессометра должна составлять $h=9,0 \text{ мм}$.

Полученные данные позволили определить геометрические размеры стенки корпуса, обеспечивающие его прочность при работе.

Практическое применение разработанного прибора при диагностировании дизельных двигателей подтвердили прочность конструкции и надежность прибора.

ВЫВОДЫ

1. На основании проведенных исследований экспериментально получено допустимое напряжение для пластика PETG. Оно составило $\sigma_{adm} = 25,0$ МПа.
2. Получена конечно-элементная модель корпуса компрессометра в программном комплексе ANSYS Workbench и проведена ее верификация.
3. Численным методом определены перемещения и напряжения в конечно-элементной модели.
4. Различными методами определена толщина

стенки $h=9,0$ мм корпуса компрессометра, изготовленной методом послойной 3D печати, обеспечивающая его прочность при давлении 4,053 МПа.

5. Отличие наибольших эквивалентных напряжений при аналитическом и численном методах расчета составляет 6,5%.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. Терентьев В.В., Баусов А.М., Кувшинов В.В., Орешков Е.Л. Исследование свойств магнитных смазочных материалов. *Аграрный вестник Верхневолжья*. 2017. № 4 (21). С. 96–102.
2. Терентьев В.В., Телегин И.А., Рябинин В.В. Повышение износостойкости трибосопряжений сельскохозяйственной и автотракторной техники путем совершенствования смазочных материалов. *Известия Международной академии аграрного образования*. 2017. № 35. С. 15–57.
3. Терентьев В. В., Аكوпова О. Б., Телегин И. А., Ельникова Л. В., Парунова Ю.М. Спектральные свойства карбоксилатов меди и опыт их применения в узлах трения сельскохозяйственной техники. *Аграрный вестник Верхневолжья*. 2019. № 1 (26). С. 79–84.
4. Терентьев В.В., Аكوпова О.Б., Баусов А.М., Герасимов А.И., Телегин И.А. Разработка и исследование антифрикционных и противоизносных дискокитических мезогенных присадок для пластичных смазок машин и оборудования. *Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии*. 2014. № 3. С. 53–56.
5. Терентьев В.В., Смирнов С.Ф., Максимовский Ю.М., Краснов А.А. Расчет начальной надежности деталей машин методом двух моментов. *Аграрный вестник Верхневолжья*. 2021. № 4 (37). С. 73–76.
6. ГОСТ 11262-2017 Пластмассы. Метод испытания на растяжение. М.: Стандартинформ, 2018. 20 с.
7. Кузьмин А.А., Яблокова М.А. Выбор допускаемых напряжений при расчете на прочность деталей из пластмасс. *Современные наукоемкие технологии*. 2016. № 8–2. С. 242–246.
8. Официальный сайт DIELECTRIC MANUFACTURING – <https://dielectricmfg.com/knowledge-base/petg>.
9. Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки. М.: Наука, 1966. 636 с.
10. Козлов Н.А., Митрофанов А.Д. Физика полимеров: Учеб. пособие. Владим. гос. ун.-т; Владимир, 2001. 345 с.
11. Вардамян Г.С., Андреев В.И., Атаров Н.М., Горшков А.А. Сопротивление материалов с основами теории упругости и пластичности. – 2-е изд., испр. и доп. М.: ИНФРА-М, 2014. 512с.

REFERENECES

1. Terentyev V.V., Bausov A.M., Kuvshinov V.V., Oreshkov E.L. Investigation of the properties of magnetic lubricants. *Agrarian Bulletin of the Upper Volga region*. 2017. N. 4 (21). P. 96-102. (in Russian).
2. Terentyev V.V., Telegin I.A., Ryabinin V.V. Increasing the wear resistance of tribo-couplings of agricultural and automotive equipment by improving lubricants. *Izvestia of the International Academy of Agrarian Education*. 2017. N. 35. P. 151-157. (in Russian).
3. Terentyev V. V., Akopova O. B., Telegin I. A., Melnikova L. V., Parunova Yu. M. Spectral properties of copper carboxylates and experience of their application in friction units of agricultural machinery. *Agrarian Bulletin of the Upper Volga region*. 2019. N.1 (26). P. 79-84. (in Russian).
4. Terentyev V.V., Akopova O.B., Bausov A.M., Gerasimov A.I., Telegin I.A. Development and research of anti-friction and anti-wear disco mesogenic additives for greases of machinery and equipment. *Izvestia of the Samara State Agricultural Academy*. 2014. N. 3. P. 53-56. (in Russian).
5. Terentyev V.V., Smirnov S.F., Maksimovsky Yu.M., Krasnov A.A. Calculation of the initial reliability of machine parts by the method of two moments. *Agrarian Bulletin of the Upper Volga region*. 2021. N. 4 (37). P. 73-76.
6. GOST 11262-80 Plastics. The method of tensile testing. M.: Standartinform, 2018. 20 p.
7. Kuzmin A.A., Yablokova M.A. The choice of permissible stresses when calculating the strength of plastic parts. *Modern high-tech technologies*. 2016. N 8-2. P. 242-246. (in Russian).
8. The official website of DIELECTRIC MANUFACTURING <https://dielectricmfg.com/knowledge-base/petg>.
9. Timoshenko S.P., Voinovsky-Krieger S. Plates and shells. M.: Nauka, 1966. 636 p.
10. Kozlov N.A., Mitrofanov A.D. Physics of polymers: A textbook. Vladimir State University; Vladimir, 2001. 345.
11. Vardanyan G.S., Andreev V.I., Atarov N.M., Gorshkov A.A. Resistance of materials with the basics of the theory of elasticity and plasticity. – 2nd ed., ispr. and add. M.: INFRA-M, 2014. 512 p.