

УДК 621.45.018.2

Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-1-54-63

**Для цитирования:** Анализ напряженно-деформированного состояния призматической опоры рычажно-градуировочного устройства стенда испытаний ЖРД / А. М. Бегишев, В. Ю. Журавлев, В. П. Назаров, А. С. Торгашин // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23, № 1. С. 54–63. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-1-54-63.

**For citation:** Begishev A. M., Zhuravlev V. Y., Nazarov V. P., Torgashi A. S. Analysis of the stress-deformed state of the prismatic support of the lever-grading device of test stands for liquid rocket engines. *Siberian Aerospace Journal*. 2022, Vol. 23, No. 1, P. 54–63. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-1-54-63.

## **Анализ напряженно-деформированного состояния призматической опоры рычажно-градуировочного устройства стенда испытаний ЖРД**

А. М. Бегишев<sup>\*</sup>, В. Ю. Журавлев, В. П. Назаров, А. С. Торгашин

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

<sup>\*</sup>E-mail alex-beg95@mail.ru

*Силоизмерительное устройство (СИУ) является частью стендовой системы измерения усилий, необходимое для прямого измерения тяги ракетного двигателя в процессе огневого испытания. Одним из распространенных типов градуировочных систем СИУ является рычажное градуировочное устройство (РГУ). Простота кинематической схемы стала одним из главных преимуществ ее использования в качестве градуировочной системы. Наряду с этим, недостатки данной схемы концентрируются в опорных элементах системы ее рычагов, поскольку именно износ опор приводит к накоплению систематической погрешности всей системы с пропорциональным ухудшением точности процесса силоизмерения. Целью работы было провести анализ особенностей призматических опор, используемых в составе РГУ СИУ, а также смоделировать напряженно-деформированное состояние модели реальной призматической опоры, эксплуатируемой в существующей силоизмерительной системе. В работе рассмотрены наиболее близкие теоретические сведения, связанные с расчетом распределения напряжений в клине и полуплоскости в соответствии с плоской задачей теории упругости. Проведены подбор механических свойств материалов в зависимости от известных показателей твердости и моделирование контактной задачи в заданной призматической опоре, в зависимости от угла наклона призмы по отношению к подушке, с помощью статического анализа программного пакета Solidworks Simulation. Приведены результаты расчета, сделаны выводы по проделанной работе.*

*Ключевые слова:* испытательный стенд ЖРД, силоизмерительное устройство, призматическая опора, система Solidworks Simulation, статический анализ напряженного состояния.

## **Analysis of the stress-deformed state of the prismatic support of the lever-grading device of test stands for liquid rocket engines**

A. M. Begishev<sup>\*</sup>, V. Y. Zhuravlev, V. P. Nazarov, A. S. Torgashin

<sup>2</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>\*</sup>E-mail alex-beg95@mail.ru

*The force measuring device is a part of the bench force measurement system required for direct measurement of the rocket engine thrust during the test. One of the common types of force-measuring device calibration systems is a lever-type calibration device. The simplicity of the kinematic scheme is one of the main advantages of its use as a calibration system. Along with this, the disadvantages of this scheme are concentrated in the supporting elements of the lever system, since it is the wear of the supports that leads to the accumulation of a systematic error of the entire system with a proportional deterioration in the accuracy of the force measurement process. The aim of the work was to analyze the features of prismatic supports used as part of a lever-based calibration device of a force-measuring device, as well as to simulate the stress-strain state of a model of a real prismatic support used in an existing force-measuring system. The work considers the closest theoretical information associated with calculating the stress distribution in the wedge and half-plane in accordance with the plane problem of the theory of elasticity. The selection of the mechanical properties of materials was carried out depending on the specified hardness indicators, as well as the modeling of the contact problem in a given prismatic support, depending on the angle of inclination of the prism in relation to the pad, using the static analysis of the Solidworks Simulation software package. The calculation results are given, conclusions are drawn on the work done.*

*Keywords: firing test stand, force-measuring device, prismatic support, Solidworks Simulation system, static analysis of the stress state.*

## **Введение**

Создание двигательных установок (ДУ) ракетно-космических комплексов требует проведения как расчетно-проектных работ, так и большого объема испытаний двигателей, ДУ и их систем в стендовых и летных условиях. Наземное испытание проводится на опытных экземплярах двигателя и представляет собой важный и наиболее трудоемкий процесс научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. В процессе огневого испытания производится регистрация большого числа рабочих параметров двигателя, по конечному анализу которых выносится решение соответствия зарегистрированных показаний расчетным. Определение силы тяги испытываемого ракетного двигателя возможно двумя путями: прямым, с помощью специальной стендовой системы измерения усилий или же косвенным, когда на основе зарегистрированных данных величина силы тяги определяется аналитически [1]. Система измерения усилий стендов испытания жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) предполагает использование специального СИУ. СИУ состоит из станка, измерительной и градуировочной системы. В качестве измерительной системы могут применяться различные схемы, включающие в себя первичные преобразователи силы. Вследствие того, что измерение силы тяги ЖРД сопряжено с учётом влияния других стендовых систем на процесс силоизмерения, предусмотрены системы и методики учёта данных негативных воздействий. Множество воздействий несут постоянный характер и учитываются аналитически до процесса подготовки ЖРД к испытанию. Воздействия, имеющие переменный характер, учитываются с помощью градуировочной системы, предназначенной для градуировки датчиков измерительной системы СИУ. Градуировка производится путем подачи на станок СИУ усилий строго определенной величины, тем самым имитируя воздействие осевой тяги двигателя на измерительную систему [2]. Погрешность градуировки, в свою очередь, представляет собой сумму систематической погрешности средств задания усилия, случайной составляющей погрешности при градуировке и погрешности регистрирующего прибора [3]. Вследствие того, что усилие от градуировочной системы принимается в качестве образцового, определяется зависимость между воздействующим на станок СИУ силой и показаниями измерительной системы, в которых уже учтены такие явления, как влияние жесткости всех технологических связей между стендовыми системами и двигателем и т. д. [4]. Выбор типа градуировочной системы, а также варианта исполнения будет зависеть от конструкции применяемого в СИУ станка. Существует несколько отработанных градуировочных систем, применяемых на стендах испытания мощных ЖРД: гидравлическая градуировочная система, РГУ. В случае РГУ система связана рычагами с подвижной рамой, через которые

к последней может быть приложена известная сила, соответствующая по направлению тяге двигателя. Все соединения рычагов с остальными частями градуировочной системы осуществляются с помощью призматических опор. В силу своей конструктивной простоты данная схема нашла широкое распространение, не смотря на свои специфические недостатки, которые концентрируются в шарнирных опорных механизмах систем рычагов.

### Конструктивная схема объекта исследования

Погрешность градуировочной системы рычажного типа зависит от точности передаточных отношений рычагов, жесткости рычагов, а также от состояния поверхностей призматических опор, так как те обладают повышенным износом при вибрационных нагрузках. Основными элементами опоры являются подушка и призма, которые изготавливаются из высококачественных сталей. Пример данной опоры приведен на рис. 1. Твердость подушки должна быть выше твердости призмы на 3–5 единицы шкалы «С» Роквелла.

К призматическим опорам предъявляются следующие основные требования: параллельность рабочих лезвий призм, минимальные радиусы рабочих лезвий, отсутствие на рабочих лезвиях сколов (вмятин, забоин). К недостаткам призматических опор относят: повышенный износ при вибрационных нагрузках (что приводит к понижению чувствительности системы и точности измерений), неспособность воспринимать боковые нагрузки, сложность передачи знакопеременных нагрузок (необходима предварительная загрузка).

В процессе проектирования конструкция рычагов закладывается с учетом определенного уровня упругого прогиба плеч рычагов под расчетной нагрузкой. По этой причине рычаги представляют собой массивные элементы, которые в процессе эксплуатации сохраняют свою жесткость. При проектировании опор исходят из подбора геометрии материалов, при которой работа опоры происходит с минимальным трением и при условии того, что максимальная расчетная нагрузка не вызывает упругой деформации рабочих элементов. В связи с этим основное внимание в части регламентных работ обращают на периодическую проверку состояния элементов опор и при необходимости производство их замены.

На основании вышеизложенного, для корректной работы РГУ важно иметь конкретное представление о напряженно-деформированном состоянии, при котором пребывают опоры в процессе передачи усилия через системы рычагов. Для проведения анализа в качестве расчетной схемы возьмем призматическую опору, работающую в составе СИУ стенов испытаний предприятий ракетно-космической промышленности, приведенную на рис. 1. Общая схема данного СИУ представлена в источнике [5].

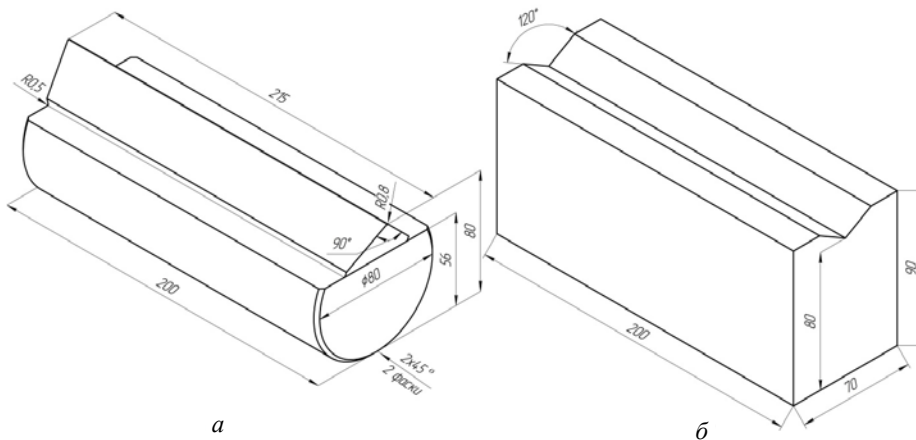


Рис. 1. Габаритная схема призматической опоры:  
а – призма; б – подушка

Fig. 1. Dimensional diagram of the prismatic support:  
а – prism; б – pad

### Теоретическая постановка задачи исследования

Приведем наиболее близкую к поставленной задаче расчетную формулу определения напряжения в клине единичной толщины под действием сосредоточенной силы, приложенной к вершине [6]. Данная формула выведена в полярной системе координат и относится к плоской задаче теории упругости:

$$\sigma_r = -\frac{2P}{r} \cdot \left( \frac{\sin \gamma \cdot \sin \varphi}{2\alpha - \sin 2\alpha} - \frac{\cos \gamma \cdot \cos \varphi}{2\alpha + \sin 2\alpha} \right), \quad (1)$$

где в соответствии с расчетной схемой, приведенной на рис. 2:  $P$  – приложенная к вершине клина сила;  $\alpha$  – половина угла раствора клина;  $\gamma$  – угол направленности силы к оси симметрии клина;  $\varphi$  – полярный угол;  $r$  – полярный радиус.

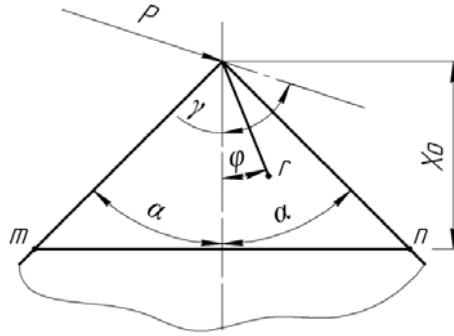


Рис. 2. Клин под действием сосредоточенной силы

Fig. 2. Wedge under concentrated force

На основании формул связи координат произвольной точки в полярной и декартовой системах координат, зависимостью между нормальными напряжениями в полярной и декартовой системах координат, а также граничными условиями на гранях клина [7; 8], можно вывести зависимости нормальных напряжений в переводе в декартовую систему координат

$$\sigma_x = -\frac{2P \cdot x^2}{\sqrt{x^2 + y^2}^3} \cdot \left( \frac{\cos \gamma \cdot x}{\sqrt{x^2 + y^2} \cdot (2\alpha + \sin 2\alpha)} + \frac{\sin \gamma \cdot y}{\sqrt{x^2 + y^2} \cdot (2\alpha - \sin 2\alpha)} \right); \quad (2)$$

$$\sigma_y = -\frac{2P \cdot y^2}{\sqrt{x^2 + y^2}^3} \cdot \left( \frac{\cos \gamma \cdot x}{\sqrt{x^2 + y^2} \cdot (2\alpha + \sin 2\alpha)} + \frac{\sin \gamma \cdot y}{\sqrt{x^2 + y^2} \cdot (2\alpha - \sin 2\alpha)} \right); \quad (3)$$

$$\tau_{xy} = \frac{xy}{x^2 + y^2} \cdot \frac{2P}{\sqrt{x^2 + y^2}} \cdot \left( \frac{\cos \gamma \cdot x}{\sqrt{x^2 + y^2} \cdot (2\alpha + \sin 2\alpha)} + \frac{\sin \gamma \cdot y}{\sqrt{x^2 + y^2} \cdot (2\alpha - \sin 2\alpha)} \right). \quad (4)$$

В соответствии с данными формулами возможно определение эпюр напряжений  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$ , в сечениях на некотором удалении от вершины клина, в условиях разных углов раствора клина, разных углов направленности сосредоточенной силы. Рассмотрим частный случай сжатия клина сосредоточенной силой, приложенной в вертикальном направлении (в формулах (2), (3), (4) угол направленности силы принимается  $\gamma = 0^\circ$ ). В данном случае сжатый клин, кроме как с позиции теории упругости, можно рассмотреть с позиции сопротивления материалов как стержень переменного сечения, тогда для некоторого сечения  $mn$  на удалении  $x_0$  от вершины получим

$$\sigma_x = -\frac{P}{F(x)} = -\frac{P}{2x_0 \cdot \operatorname{tg} \alpha}. \quad (5)$$

В данном случае напряжения  $\sigma_x$  равномерно распределены по сечению. При угле  $\gamma = 30^\circ$  эти напряжения по абсолютной величине на 17 % меньше, чем наибольшие напряжения, полученные по точным формулам теории упругости (2), (3), (4). С увеличением  $\gamma$  это расхождение возрастает. Например, при  $\gamma = 45^\circ$  оно становится равным 36 %. Напряжения  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$ , которые не учитываются в сопротивлении материалов, имеют одинаковый порядок с напряжениями  $\sigma_x$ .

Стоит отметить следующую особенность: формулы для расчета клина (2), (3), (4) справедливы для случая воздействия силы на клин с углом раствора  $2\gamma = 180^\circ$  и более. В данном случае клин перерождается в полуплоскость, т. е. пластину единичной толщины, неограниченно простирающуюся по одну сторону от горизонтальной границы. В полуплоскости возникает плоское напряженное состояние (так называемая задача Фламана). Тем самым имитируется приложение сосредоточенной силы к подушке призматической опоры, по типу представленной на рис. 1, б.

Расчет клина по формулам теории упругости предполагает, что сила приложена к кромке клина, которая не имеет закругления, но в реальности в призматической опоре на лезвии призмы задается минимальный радиус, для исключения выкрашивания кромки в случае проявления ударных нагрузок и тем самым для улучшения эксплуатационных характеристик опоры. Но с учетом в данном вопросе критерия о стремления минимизации скругления лезвия, приведенные формулы теории упругости для расчета распределения напряжений в отдельных элементах призматической опоры можно считать справедливыми.

По своей сути работа призматической опоры является контактной задачей, при которой элемент опоры под нагрузкой воздействует на другой элемент. В случае геометрических особенностей в части скругления кромок и т. д., которые напрямую влияют на контактное взаимодействие между элементами, приведенный раздел теории упругости ответов не дает. Было решено произвести расчет контактных взаимодействий в конкретной опоре методом конечных элементов, воспользовавшись одним из соответствующих пакетов программ.

### Методика исследования

Принято решение провести расчет с помощью программного пакета Solidworks Simulation. Геометрические размеры элементов исследуемой опоры представлены на рис. 1. Призма с углом раскрытия  $90^\circ$  и радиусным скруглением кромки лезвия  $r = 0,8$  мм выполнена из инструментальной стали У8, при изготовлении которой в качестве заготовки используется сортовой стальной горячекатаный прокат круглого сечения. Данная сталь обладает повышенной прочностью, значительной твердостью, которая обеспечивается поэтапной термической обработкой, и имеет высокую способность переносить значительные вибрационные и механические нагрузки в условиях, не вызывающих разогрева рабочей кромки. Подушка с углом раскрытия  $120^\circ$  выполнена без скругления внутренней кромки из инструментальной стали У9. Сталь отличается несколько повышенным содержанием в составе углерода по сравнению со сталью У8, но в целом обладает схожими механическими характеристиками.

В соответствии с конструкторской документацией для элементов опоры заданы необходимые диапазоны значений твердости по Роквеллу (HRC), средние значения которых занесены в табл. 1. Значения таких характеристик для сталей, как модуль упругости ( $E$ ), массовая плотность ( $\rho$ ), модуль сдвига ( $G$ ), коэффициент Пуассона ( $\mu$ ) занесены в табл. 1 на основании справочника марочных сталей [9]. В процессе поиска в различных источниках не обнаружено достаточно данных для корреляции пределов прочности и текучести в условиях различных режимов термообработки, которые бы обеспечили необходимую твердость поверхности. В связи с этим было решено на основании выкладок, приведенных в источнике [10], определить механические свойства металлов по показателям твердости. Для этого известные значения твердости по Роквеллу (HRC) необходимо было перевести в соответствующие показания твердости по Бринеллю (HB), для чего была использована таблица перевода источника [9]. Для удобства последующих действия данные значения нужно перевести в размерность [МПа]. В работе [11]

приведены следующие эмпирические зависимости твердости по Бринеллю (НВ) и пределов прочности и текучести, выведенные на основе анализа экспериментальных результатов:

$$\sigma_b = 0,333 \cdot \text{НВ}; \quad (6)$$

$$\sigma_{0,2} = \frac{0,3 \cdot \text{НВ} - 50}{1,03}. \quad (7)$$

На основании формул (6), (7) занесем в табл. 1 вычисленные пределы прочности и пределы текучести элементов опоры, с учетом выведенных ранее показаний твердости по Бринеллю (НВ).

Таблица 1

Механические свойства материалов элементов опоры

	Сталь	Твердость			$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	E, ГПа	G, ГПа	$\mu$	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
		HRC	НВ, кгс/мм <sup>2</sup>	НВ, МПа						
Призма	У8	60	611	5992	1995	1697	209	81	0,25	7839
Подушка	У9	63	655	6423	2139	1822	207	79	0,25	7745

Призма фиксируется посредством запрессовки её цилиндрической части в паз рычага. Вследствие этого призма воспринимает нагрузку от рычага по площади цилиндрической части её основания, в связи с чем именно данная грань призмы выбрана в качестве площадки приложения силы в процессе расчета призмной опоры. В качестве расчетной нагрузки принято, что на цилиндрическое основание призмы приложена сила 50000 кгс (490,3 кН). Реальная подушка также имеет в своей конструкции радиусное основание, но так как основание подушки в процессе расчета зафиксировано и лишь воспринимает нагрузку, было решено упростить конструкцию модели подушки. На рис. 3 представлена модель опоры с построенной сеткой, а также расчетная схема, согласно которой на цилиндрическое основание приложена известная сила  $P$ . Данная опора имеет максимальный ход поворота призмы относительно подушки в 30°, в связи с этим было решено проанализировать состояние опоры при разных положениях призмы относительно точки О (центр радиусного скругления лезвия призмы) с шагом в 3°. Расчетная сетка модели имеет локальные уплотнения в местах контакта элементов для повышения точности результатов и экономии вычислительных ресурсов компьютера [12].

Кроме фиксированной грани, необходимо приложить граничное условие «Соединения – нет проникновения» в местах контакта деталей друг с другом. В связи с тем, что площадки соприкосновения на начальном этапе представляют собой отрезки, образующиеся касанием лезвия призмы и граней подушки, для дальнейшего корректного расчета необходимо наложить граничные условия на грани, образующиеся этот самый контакт. Все необходимые действия для запуска решения произведены, можно переходить к проведению решения.

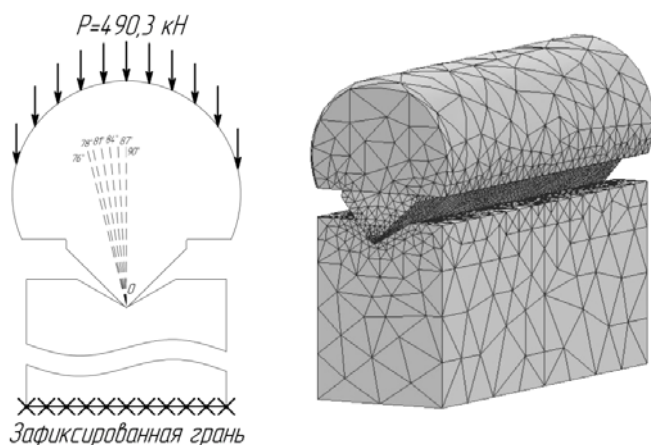


Рис. 3. Расчетная модель:  
а – схема нагружения; б – модель с построенной сеткой

Fig. 3. Calculation model:  
a – loading scheme; b – mesh model

**Результаты расчета призматической опоры**

По окончании расчета представляются следующие результаты напряжения, перемещения и деформации [13]. На рис. 4, 5 показаны напряженно-деформированное состояние призматической опоры и концентрация напряжения на поверхности лезвия призмы в напряжениях по Мизесу, эпюры перемещений и относительной деформации в условиях воздействия призмы под углом 90°.

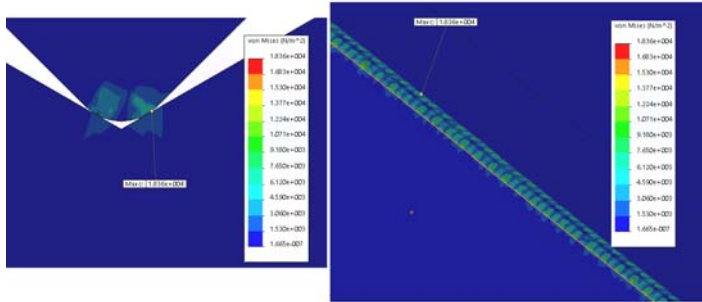


Рис. 4. Распределение напряжений в зоне контакта призматической опоры

Fig. 4. Stress distribution in the contact zone of the prismatic support

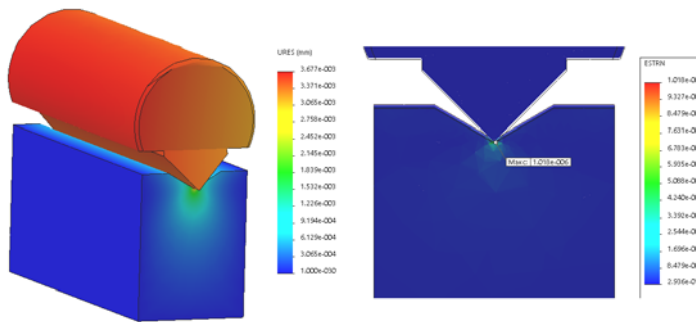


Рис. 5. Эпюра перемещений и эпюра относительной деформации

Fig. 5. Displacement Plot and Relative Deformation Plot

Как видно из распределения эквивалентных напряжений, максимальное напряжение образуется в области лезвия призмы, для определения же максимального напряжения на поверхности подушки необходимо воспользоваться инструментом зондирования и, выбрав для анализа контактные грани подушки, определить максимальное значение напряжения [14].

На основании перечисленных манипуляций произведена проверка максимальных напряжений в элементах опоры при различных углах воздействия призмы на подушку. Результаты анализа занесены в табл. 2. Для наглядности результатов, данные преобразованы в график, приведенный на рис. 6. В качестве крайнего положения призмы выбран угол 76°, так как в данном случае отсутствует влияние контакта рабочей грани призмы с гранью подушки.

Таблица 2

**Максимальные эквивалентные напряжения при различных положениях призмы относительно подушки**

	Угол воздействия призмы на подушку					
	90°	87°	84°	81°	78°	76°
$\sigma_{\max}$ на поверхности призмы (Von Mises), кПа	18,36	19,74	21,68	25,47	27,71	23,95
$\sigma_{\max}$ на поверхности подушки (Von Mises), кПа	2,92	2,884	3,04	3,71	3,61	3,66



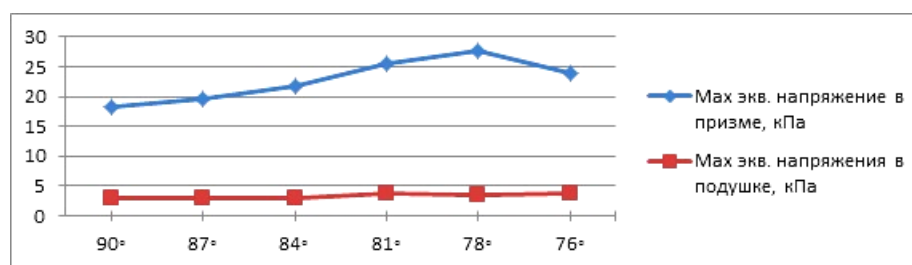


Рис. 6. График изменения максимальных эквивалентных напряжений с изменением положения призмы относительно подушки

Fig. 6. A graph of the change in the maximum equivalent stresses with a change in the position of the prism relative to the pad

Эквивалентные максимальные напряжения призмы имеют более высокие значения, нежели напряжения подушки. Расчет данной опоры показал, что при воздействии значительной силы на основание призмы, возникают значения напряжений гораздо меньшие по сравнению с пределами текучести для заданных материалов. Данный момент говорит о том, что работа опоры происходит в зоне упругих деформаций и РГУ, имеющий в своей конструкции данную призматическую опору, в условиях работы со статической нагрузкой, не склонен в процессе эксплуатации к потере точности вследствие накопления деформаций в опоре.

### Заключение

Существующие градуировочные рычажные системы в области испытания ракетных двигателей переживают период морального устаревания. На вертикальных огневых стендах для испытания мощных ЖРД, СИУ представляет собой капитальную конструкцию. В данном случае переход с рычажной градуировочной системы на другой тип, в силу разницы исполнения, потребует полной переработки СИУ, что не может не сказаться на трудоемкости и стоимости процесса. Наряду с этим имеют место концепции усовершенствования рычажной градуировочной системы с помощью добавления в состав дополнительного силозадающего устройства: гидравлического (источник [5]) или электромеханического типа (источник [15]). Данные схемы предполагают увеличение заданного приводом усилия через рычажную систему до необходимых величин. В связи с этим важно уметь прогнозировать и анализировать процесс на базе современных методик проектирования. В данной работе проведен статический анализ модели призматической опоры с помощью программного пакета Solidworks Simulation. Перечислены все граничные условия для осуществления расчета, получена модель напряженно-деформированного состояния призматической опоры в разных условиях нагружения.

### Библиографические ссылки

1. Галеев А. Г Основы устройства испытательных стендов для отработки жидкостных ракетных двигателей и двигательных установок : руководство для инженеров-испытателей. Пересвет : Изд-во ФКП “НИЦ РКП”, 2010. 178 с.
2. Методология экспериментальной отработки ЖРД и ДУ, основы проведения испытаний и устройства испытательных стендов: монография / Г. А. Галеев, В. Н. Иванов, А. В. Катенин и др. Киров : МЦНИП, 2015. 436 с.
3. Kleckers T., Dr. A. Schaefer Force Calibration with Build Up Systems // 18th International Congress of Metrology, 2017, DOI: 10.1051/metrology/201714009.
4. Колымагин А. Н., Медведев В. К. Учет влияния жесткости связей силоизмерительного устройства при измерении тяги ЖРД на огневом стенде // Тр. НПО Энергомаш им. акад. Глушко. 2012. С. 286–289.



5. Веселов А. В. Модернизация тягоизмерительного устройства на испытательных стендах жидкостных ракетных двигателей // Решетневские чтения : материалы XXII Междунар. науч. практ. конф. (12–16 ноября 2018, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2018. С. 198–200.
6. Прочность, устойчивость, колебания : справочник. В 3 т. Т. 1. / И. А. Биргер, Я. Г. Пановко и др. М. : Машиностроение, 1968. 821 с.
7. Семенов Д. Л. Решения задач теории упругости, используемые для оценки контактной прочности и жесткости деталей машин // Тр. Одесского политех. ун-та, 2007. С. 13–18.
8. Нахатакян Ф. Г. Решение плоской контактной задачи теории упругости с помощью модели упругого полупространства // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2011. С. 63–67.
9. Марочник сталей и сплавов : 2-е изд., исправл. и доп. / А. С. Зубченко, М. М. Колосков, Ю. В. Каширский и др. М. : Машиностроение, 2003. 784 с.
10. Стоев П. И., Мощенок В. И. Определение механических свойств металлов и сплавов по твердости // Вестник Харьковского нац. ун-та им. В. Н. Каразина. 2003. Т. 601, № 2. С. 106.
11. Марковец М. П. Определение механических свойств металлов по твердости. М. : Машиностроение, 1979. 191 с.
12. Душин И. Ф., Маскайкина С. Е., Полуешина Н. И. Прочностной расчет корпуса шестеренного насоса с использованием SolidWorks Simulation // Вестник Мордовского ун-та. 2014. № 1–2. С. 154–160.
13. Гадиев Д. А. Оптимизация конструктивных особенностей с использованием Solidworks // Научно-практические исследования. 2020. № 1–4. С. 27–31.
14. Зеньков Е. В. Оценка напряженного состояния и усталостной долговечности призматического образца на основе численного моделирования // Вестник Иркутского гос. тех. ун-та. 2013. № 5(76). С. 32–38.
15. Бегишев А. М., Журавлев В. Ю., Торгашин А. С. Особенности и возможный путь модернизации силоизмерительных устройств испытательных стендов жидкостных ракетных двигателей // Сибирский журнал науки и технологий. 2020. Т. 21, № 1. С. 62–70.

## References

1. Galeev A. G. *Osnovy ustrojstva ispytatel'nyh stendov dlya otrabotki zhidkostnyh raketnyh dvigateley i dvigatel'nyh ustanovok. Rukovodstvo dlya inzhenerov-ispytateley* [Fundamentals of test benches for testing liquid propellant rocket engines and propulsion systems. Test Engineer Guide]. Peresvet, Izd-vo FKP "NIC RKP" Publ., 2010, 178 p.
2. Galeev G. A., Ivanov V. N., Katenin A. V. et al. *Metodologiya eksperimental'noy otrabotki ZHRD i DU, osnovy provedeniya ispytaniy i ustrojstva ispytatel'nyh stendov* [Methodology for the experimental development of LRE and PS, the basics of testing and test bench devices]. Kirov, MCNIP Publ., 2015, 436 p.
3. Kleckers T., Dr. A. Schaefer Force Calibration with Build Up Systems. *18th International Congress of Metrology*, 2017. Doi: 10.1051/metrology/201714009.
4. Kolymagin A. N., Medvedev V. K. [Accounting for the Influence of the Rigidity of the Bonds of the Force-Measuring Device in Measuring the Thrust of a LRE on a Firing Bench]. *Trudy NPO Energomash im. akademika Glushko*. 2012, P. 286–289.
5. Veselov A. V. [Modernization of the load-measuring device on the test benches of liquid rocket engines]. *Reshetnevskie chteniya : materialy XXII Mezhdunar. nauch. konf. (12–16 noyabrya 2018, g. Krasnoyarsk) v 2 ch.* [International science and research conference (in memory of the M. F. Reshetnev, general constructor of space vehicles and rocket systems)]. Krasnoyarsk, 2018, P. 198–200.
6. Birger I. A., Panovko Y. G. et al. *Prochnost', ustojchivost', kolebaniya. Spravochnik v trekh tomah. Tom 1.* [Strength, stability, vibrations. Handbook in three parts. Part 1]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968, 821 p.

7. Semenov D. L. [Solutions of problems of the theory of elasticity used to assess the contact strength and stiffness of machine parts]. *Trudy Odesskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2007, P. 13–18.
8. Nahatkyan F. G. [Solution of a plane contact problem of the theory of elasticity using an elastic half-space model]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*. 2011, P. 63–67.
9. Zubchenko A. S., Koloskov M. M., Kashirskij Y. V. *Marochnik stalej i splavov* [Grade of steels and alloys]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003, 784 p.
10. Stoev P. I., Moshchenok V. I. [Determination of mechanical properties of metals and alloys by hardness]. *Vestnik Har'kovskogo nacional'nogo universiteta im. V. N. Karazina*. 2003, Vol. 601, No. 2, P. 106 (In Russ.).
11. Markovec M. P. *Opređenje mekhanicheskikh svojstv metallov po tverdosti* [Determination of the mechanical properties of metals by hardness]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979, 191 p.
12. Dushin I. F., Maskajkina S. E., Polueshina N. I. [Strength calculation of the gear pump casing using SolidWorks]. *Vestnik Mordovskogo universiteta*. 2014, No. 1-2, P. 154–160.
13. Gadiev D. A. [Optimizing Design Features Using Solidworks]. *Nauchno-prakticheskie issledovaniya*. 2020, No. 1–4, P. 27–31.
14. Zen'kov E. V. [Estimation of the stress state and fatigue life of a prismatic sample based on numerical simulation]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2013, No. 5(76), P. 32–38.
15. Begishev A. M., Zhuravlev V. Yu., Torgashin A. S. [Features and possible way of modernization of force-measuring devices of test stands of liquid-propellant rocket engines]. *Sibirskij zhurnal nauki i tekhnologii*. 2020, Vol. 21, No. 1, P. 62–70.

© Бегисhev А. М., Журавлев В. Ю., Назаров В. П., Торгашин А. С., 2022

---

**Бегисhev Алексей Михайлович** – аспирант; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: alex-beg95@mail.ru.

**Журавлев Виктор Юрьевич** – кандидат технических наук, профессор кафедры двигателей летательных аппаратов; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: vz@sibsau.ru.

**Назаров Владимир Павлович** – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой двигателей летательных аппаратов; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: Dla@sibsau.ru.

**Торгашин Анатолий Сергеевич** – аспирант; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: ttarg23@gmail.com.

**Begishev Aleksey Mikhaylovich** – graduate student; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: alex-beg95@mail.ru.

**Zhuravlev Viktor Yur'yevich** – Cand. Sc., Professor of a department of Aircraft Engines; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: vz@sibsau.ru.

**Nazarov Vladimir Pavlovich** – Cand. Sc., Professor, Head of the Department of Aircraft Engines; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: Dla@sibsau.ru.

**Torgashin Anatoliy Sergeevich** – graduate student; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: ttarg23@gmail.com.

---