<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-4-87-94>

УДК 539.3

Экспериментальное исследование и математическое моделирование взаимодействия полусферического днища контейнера со связным грунтом

Р. Ф. Шамгунов¹, Л. А. Игумнов², К. П. Жегалова², В. Л. Котов²,
В. С. Метрикин², Д. А. Казаков²

¹ Акционерное общество «Нижегородский завод 70-летия Победы»,
Нижний Новгород, Российская Федерация

² Федеральное государственное автономное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»,
Нижний Новгород, Российская Федерация

Объектом настоящего исследования является изделие ПВО (контейнер). Проведены экспериментальные и расчетные исследования процессов силового взаимодействия твердого тела, моделирующего днище контейнера, с пылевато-глинистым грунтом различной влажности с целью оценки параметров силы взаимодействия контейнера с грунтом. Показано, что эмпирическая модель проникания в грунт, предполагающая постоянное напряжение на поверхности контакта индентор–грунт, позволяет описать полученные экспериментальные данные.

Ключевые слова: изделия ПВО, днище контейнера, математические модели взаимодействия твердых тел с грунтами, грунт, грунт в обойме, металлическая обойма, сферический индентор, квазистатическое нагружение

Для цитирования: Шамгунов Р. Ф., Игумнов Л. А., Жегалова К. П., Котов В. Л., Метрикин В. С., Казаков Д. А. Экспериментальное исследование и математическое моделирование взаимодействия полусферического днища контейнера со связным грунтом // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2020. № 4. С. 87–94. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-4-87-94>

For citation: Shamgunov R. F., Igumnov L. A., Zhegalova K. P., Kotov V. L., Metrikin V. S., Kazakov D. A. Experimental study and mathematical modelling of the interaction between the hemispherical bottom of a container with cohesive soil // Vestnik Koncerna VKO "Almaz – Antey". 2020. No. 4. P. 87–94. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-4-87-94>

Поступила 16.11.2020 Отрецензирована 23.11.2020 Одобрена 10.12.2020 Опубликована 30.12.2020

Введение

Изделия ПВО типа С-400 могут применять поражающие средства дальнего и ближнего радиуса действия, устанавливаемые в транспортные контейнеры (ТПК) одной и той же пусковой установки (ПУ). Ракеты ближнего радиуса действия должны запускаться одна за другой с малыми интервалами времени (менее 3 сек). Однако после каждого пуска ракеты ПУ и ее контейнеры совершают продольно-поперечные колебания в течение большего

времени, что может создать неблагоприятные условия для старта следующей ракеты. Поэтому такие колебания необходимо гасить. Для определения параметров демпфирования и разработки технических средств гашения таких колебаний требуется разработать математические модели взаимодействия твердых тел (ТПК и ПУ) с грунтами различного типа. Для получения результатов достаточной точности для реальных изделий необходимо выполнить расчетно-экспериментальные исследования с физическими моделями, чему и посвящена данная работа.

Моделирование взаимодействия твердого тела с грунтом важно также для гашения

© Шамгунов Р. Ф., Игумнов Л. А., Жегалова К. П., Котов В. Л., Метрикин В. С., Казаков Д. А., 2020

колебаний вращающихся радиолокаторов, базирующихся на подвижных или неподвижных вывешенных на домкратах платформах, т.к. сильная качка может серьезно исказить картину подсветки и приема, а также уменьшить ресурс опорно-поворотных устройств.

Для оценки сил, действующих на изделие ПВО (контейнер) при его силовом взаимодействии с грунтом, необходимо обладать экспериментальными данными о прочности или сцеплении грунта. Для определения величины сил сцепления дисперсных связных грунтов и вязких пород с учетом изменения их во времени применяется метод испытаний шарового штампа Н.А. Цытовича [1]. При испытании на специальном приборе или в натуре на особой установке измеряют осадки шарового штампа при некоторой постоянной нагрузке. Величина нагрузки при этом должна быть не очень малой, чтобы упругими деформациями грунта можно пренебречь. В качестве расчетных зависимостей используется решение А.Ю. Ишлинского [2], полученное для модели идеальной жесткопластической среды. Как показывают соответствующие исследования, сцепление, определяемое по методу шарового штампа, следует рассматривать как некоторую комплексную характеристику, позволяющую оценить не только сцепление, но для пластичных грунтов в известной мере и внутреннее трение, что может быть использовано, например, при вычислении предельной нагрузки на глинистые грунты по формулам идеально связанных тел (без учета трения, которое автоматически учитывается величиной сцепления грунта) [1]. Среднее контактное давление определяется как отношение нормальной нагрузки на сферу к площади проекции отпечатка на поверхности деформируемого полупространства – или твердость по Майеру [3].

Другая модель для оценки сопротивления квазистатическому внедрению тела в грунт, нашедшая широкое практическое применение [4, 5], основана на предположении о постоянстве напряжения, действующего по нормали к поверхности индентора. С учетом разброса свойств реальных грунтов и неопределенности их состава подобная

модель может оказаться предпочтительнее при соответствующей калибровке на основе экспериментальных данных [6].

В настоящей статье приведены результаты экспериментальных и расчетных исследований процессов взаимодействия твердого тела, моделирующего днище контейнера, с пылевато-глинистым грунтом различной влажности с целью оценки параметров силы взаимодействия контейнера с грунтом. Показано, что эмпирическая модель проникания в грунт, предполагающая постоянное напряжение на поверхности контакта индентор–грунт, позволяет описать полученные экспериментальные данные.

Методика проведения экспериментов

Проведены испытания по внедрению стального индентора в специально приготовленный грунт, заключенный в стальной обойме в статическом режиме нагружения. Испытания были проведены для двух партий грунта разной влажности, заключенного в металлической обойме. Был использован пылевато-глинистый грунт влажностью 25 % для партии 1 и 20 % для партии 2. Грунт был специально приготовлен и утрамбован в металлические обоймы. Часть испытаний проводились с использованием смазки поверхности индентора минеральным маслом.

Для проведения испытаний была изготовлена оснастка. Инденторы диаметром 5, 10 и 13,5 мм были изготовлены из стали 40Х. Металлическая обойма была изготовлена из металлической электросварной прямошовной трубы по [7]. Наружный диаметр обоймы 88 мм, внутренний диаметр 81,4 мм, высота обоймы 60 мм. Размеры инденторов и обойм принимались в соответствии с минимальными размерами образцов в зависимости от диаметра индентора, указанными в [8].

Эксперименты выполнялись на испытательном комплексе Z100 ZWICK/ROEL, позволяющем проводить испытания на растяжение, сжатие сплошных и трубчатых образцов, сложное нагружение на трубчатых образцах при одновременном синхронизированном по времени задании параметров – скорость изменения продольной силы (перемещения) – скорость

изменения крутящего момента (угла закручивания) – скорость изменения внутреннего давления. Предельные значения параметров испытательной техники – по силе ± 100 кН. Измерительная аппаратура комплекса включает в себя датчик силы 0–250 кН, класс точности 1 по ISO 7500-1. Измерение глубины индентирования проводилось «косвенным методом» с помощью штатного устройства измерения перемещений, связанного с подвижной траверсой испытательной машины Z100 с точностью порядка 1 мкм от измеряемой величины (осевые перемещения испытуемого образца, жестко связанного с подвижной траверсой машины, фиксируются встроенным в установку цифровым датчиком перемещений, который обеспечивает позиционирование траверсы в искомой точке с точностью не более 1 мкм). Управление экспериментом, регистрация и обработка данных, полученных в ходе испытания, осуществляются с помощью электронной системы, включающей ПК с программным комплексом TestXpert2, адаптированным для данной испытательной машины. Программное обеспечение testXpert2 настраивается для проведения различных типов испытаний и предоставляет возможность получения необходимых экспериментальных значений параметров исследуемого процесса

в параметрическом или других видах с последующей их обработкой.

Метрологическое обеспечение предоставляемых экспериментов подтверждается Сертификатами о поверке используемого оборудования, выданными Нижегородским ЦСМ.

Результаты испытаний

Проведены испытания внедрения стального индентора в специально приготовленный грунт, заключенный в стальной обойме, в статическом режиме нагружения. Испытания были проведены для двух партий грунта разной влажности.

Партия 1. Скорость движения индентора (скорость подвижной траверсы испытательной машины) принималась в соответствии с возможностями испытательной машины $V_1 = 10$ мм/мин, $V_2 = 8$ мм/сек. Показано, что изменение скорости нагружения в данном диапазоне не оказывает влияния на результаты. Поэтому при испытании следующей партии образцов скорость была принята $V_1 = 10$ мм/мин.

Партия 2. Скорость движения индентора принималась $V_1 = 10$ мм/мин. Для образцов № 2.2, 2.3, 2.4, 2.6, 2.9, 2.10 перед испытанием была проведена смазка индентора минеральным маслом (для снижения сил трения на боковой

Рис. 1. Диаграмма индентирования для партии 1

— 1,1 $d = 13,5$ мм $V = 8$ мм/с; — 1,2 $d = 13,5$ мм $V = 8$ мм/с; — 1,3 $d = 13,5$ мм $V = 10$ мм/мин; — 1,4 $d = 10$ мм $V = 10$ мм/мин; — 1,5 $d = 10$ мм $V = 8$ мм/с; — 1,6 $d = 5$ мм $V = 10$ мм/мин; — 1,7 $d = 5$ мм $V = 8$ мм/с; — 1,8 $d = 13,5$ мм $V = 8$ мм/с; — 1,9 $d = 13,5$ мм $V = 10$ мм/мин

Рис. 2. Диаграмма индентирования для партии 2

— 2,1 $d = 13,5$ мм; — 2,2 $d = 13,5$ мм смазка; — 2,3 $d = 13,5$ мм смазка; — 2,4 $d = 10$ мм смазка; — 2,5 $d = 10$ мм; — 2,6 $d = 10$ мм смазка; — 2,7 $d = 10$ мм; — 2,8 $d = 5$ мм; — 2,9 $d = 5$ мм смазка; — 2,10 $d = 5$ мм смазка; — 2,11 $d = 5$ мм; — 2,12 $d = 5$ мм

поверхности индентора при глубине индентирования, превышающей радиус индентора). Показано, что смазка индентора не оказывает влияния на полученные результаты.

Пересчет машинной диаграммы «усилие ~ глубина индентирования» в диаграмму «напряжение ~ деформация» проводился по следующим формулам:

$r = \sqrt{R^2 - (R - u_0)^2}$	Напряжение:	Деформация:
	$\sigma = F/S,$ $\sigma = \frac{10 \cdot F}{\pi \cdot r^2},$ где F – усилие, выдаваемое оборудованием, кгс; S – площадь сегмента, мм ²	$U = \frac{u_0}{R},$ где u_0 – глубина индентирования, мм

Полученные диаграммы приведены на рисунках 3, 4.

Модель квазистатического взаимодействия твердой сферы с грунтом

В механике грунтов при аппроксимации нормального давления на поверхности тела, взаимодействующего с грунтом, получила распространение [4, 5] зависимость вида

$$\sigma_n = \alpha V^2 + \gamma,$$

где α – коэффициент, равный плотности грунта, более подробно рассмотрен в работах [9, 10]; V – нормальная компонента вектора скорости движения тела;

γ – постоянный коэффициент, равный прочности грунта на сжатие.

Касательное напряжение на поверхности движущегося в среде тела определим в соответствии с моделью трения Кулона

$$\sigma_\tau = k_f \sigma_n,$$

где k_f – постоянный коэффициент поверхностного трения.

Уравнение силы сопротивления может быть представлено в виде:

$$F = 2\pi R^2 \int_0^\varphi (\sigma_n \cos \varphi + \sigma_\tau \sin \varphi) \sin \varphi d\varphi,$$

где φ – угол, отсчитываемый от вершины сферы в направлении свободной поверхности.

Рис. 3. Диаграммы для партии 1

— 1,1 d = 13,5 мм V = 8 мм/с; — 1,2 d = 13,5 мм V = 8 мм/с; — 1,3 d = 13,5 мм V = 10 мм/мин; — 1,4 d = 10 мм V = 10 мм/мин; — 1,5 d = 10 мм V = 8 мм/с; — 1,6 d = 5 мм V = 10 мм/мин; — 1,7 d = 5 мм V = 8 мм/с; — 1,8 d = 13,5 мм V = 8 мм/с; — 1,9 d = 13,5 мм V = 10 мм/мин

Рис. 4. Диаграммы для партии 2

— 2,1 d = 13,5 мм; — 2,2 d = 13,5 мм смазка; — 2,3 d = 13,5 мм смазка; — 2,4 d = 10 мм смазка; — 2,5 d = 10 мм; — 2,6 d = 10 мм смазка; — 2,7 d = 10 мм; — 2,8 d = 5 мм; — 2,9 d = 5 мм смазка; — 2,10 d = 5 мм смазка; — 2,11 d = 5 мм; — 2,12 d = 5 мм

После интегрирования получим:

$$F = \alpha \frac{\pi R^2 V^2}{2} \left(1 - \cos^4 \varphi + k_f \left(\frac{\varphi}{2} + \frac{1}{2} \cos \varphi \sin \varphi - \sin \varphi \cos^3 \varphi \right) \right) + \gamma \pi R^2 (\sin^2 \varphi + k_f (\varphi - \cos \varphi \sin \varphi)).$$

Определим среднее давление как

$$p_m = \frac{F}{\pi r^2},$$

где r – радиус пятна контакта.

$$p_m(\varphi = 0) = \alpha V^2 + \gamma, \quad p_m\left(\varphi = \frac{\pi}{2}\right) = \alpha \frac{V^2}{2} \left(1 + k_f \frac{\pi}{4} \right) + \gamma \left(1 + k_f \frac{\pi}{2} \right)$$

(при $\varphi = 0 \rightarrow r = R$, при дальнейшем погружении индентора пятно контакта не растет).

Применим линейную интерполяцию для среднего давления в зависимости от глубины проникновения и приближенно определим силу сопротивления следующим образом:

$$F = (A + Bw) \pi \alpha^2 = \pi (2ARw + (2BR - A)w^2 - Bw^3),$$

где $A = \alpha V^2 + \gamma$, $B = k_f \frac{\pi}{2R} \left(\alpha \frac{V^2}{4} + \gamma \right) - \alpha \frac{V^2}{2R}$. При выводе также использовалось соотношение $r^2 = 2Rw - w^2$.

Рассмотрим случай малых глубин погружения сферы, полагая $\cos \varphi \approx 1$, $\frac{\alpha}{R} = \sin \varphi \approx \varphi$ и пренебрегая членами более высокого порядка малости $O(w)$, будем иметь линейную зависимость силы сопротивления внедрению от глубины проникновения:

Рис. 5. Сила сопротивления внедрению: эксперимент и расчет

$F \approx 2(\alpha V^2 + \gamma) \frac{w}{R} \pi R^2 = 2(\alpha V^2 + \gamma) \tilde{w} \pi R^2$, где обозначено $\tilde{w} = \frac{w}{R}$ – безразмерная глубина проникновения.

В случае погружения с малыми скоростями (квазистатическое вдавливание) будем иметь $A \approx \gamma$, $B \approx \gamma k_f \frac{\pi}{2R}$ и

$$F \approx \pi R^2 \left(2 \frac{w}{R} + (k_f \pi - 1) \left(\frac{w}{R} \right)^2 - k_f \frac{\pi}{2} \left(\frac{w}{R} \right)^3 \right) \gamma = \pi R^2 \left(2 \tilde{w} + (k_f \pi - 1) \tilde{w}^2 - k_f \frac{\pi}{2} \tilde{w}^3 \right) \gamma.$$

Преобразуем выражение для силы сопротивления при учете равенства $r^2 = 2Rw - w^2$

$$F \approx \pi r^2 \left(1 + k_f \frac{\pi w}{2R} \right) \gamma.$$

Таким образом, отношение силы сопротивления квазистационарному внедрению к текущей площади миделя (наибольшее по площади поперечное сечение) поверхности индентора определяет величину прочности грунта. Отклонение зависимости от горизонтальной прямой свидетельствует о вкладе трения в результирующую силу сопротивления.

Для определения значений постоянных коэффициентов воспользуемся экспериментальными данными.

Результаты экспериментов и расчетов

Для апробации полученных соотношений были выбраны результаты экспериментов с индентором диаметром 10 мм.

Рис. 6. Прочность грунта: эксперимент и расчет

На рисунке 5 приведены силы сопротивления внедрению, полученные в эксперименте (темные маркеры – без смазки, светлые маркеры – со смазкой) и эмпирической зависимости при наличии трения (сплошная линия) и при отсутствии трения (штриховая линия) при значениях параметров $\gamma = 0,215$ МПа, $k_f = 1/3$ (данные значения определялись методом наименьших квадратов).

На рисунке 6 приведены силы сопротивления внедрению, отнесенные к текущей площади миделя, полученные в эксперименте (темные маркеры – без смазки) и на основе теоретической зависимости при наличии трения (сплошная линия) и при отсутствии трения (штриховая линия).

Можно отметить, что результаты расчетов при значениях параметров $\gamma = 0,215$ МПа, $k_f = 1/3$ достаточно хорошо соответствуют полученным экспериментальным данным.

Для грунта второй партии экспериментов проведены аналогичные сравнения. Таким образом, проведенные расчетные и экспериментальные исследования показали практическую применимость эмпирической модели, ее достаточную чувствительность к изменению влажности грунта.

Выводы

Проведенные экспериментальные и расчетные исследования процессов силового взаимодействия твердого тела, моделирующего днище контейнера, с грунтом позволили с применением современной технологии проведения экспериментов на современном оборудовании получить оценки характеристик исследуемого процесса в зависимости от скорости погружаемого тела, прочности грунта, геометрических размеров погружаемого тела, оценить величины возникающих напряжений.

Испытания по внедрению стального индентора в специально приготовленный грунт, заключенный в стальной обойме, в статическом режиме нагружения показали, что изменение скорости нагружения в данном диапазоне (минимальная скорость 10 мм/мин, максимальная скорость 8 мм/сек) и смазка индентора не оказывают существенного влияния на характеристики процесса внедрения индентора.

Приведенные диаграммы индентирования и данные экспериментов позволяют получить справочный материал по величине погружения твердого тела (днища контейнера) в зависимости от его веса, геометрии, прочности грунта.

Используемая современная измерительная аппаратура комплекса, высокоточные датчики перемещения траверсы и программное обеспечение testXpert дали возможность предоставлять необходимые экспериментальные значения параметров исследуемого процесса в параметрическом виде, удобном для практического использования.

Проведенные испытания по индентированию стальной сферы в пылеватый глинистый грунт позволили установить увеличение прочности практически в два раза при изменении влажности с 25 до 20 %. Для получения количественной зависимости прочности грунта от влажности и/или других показателей необходимы дополнительные экспериментальные исследования.

Список литературы

1. Цытович Н.А. Механика грунтов. М.: Высшая школа, 1973. 288 с.
2. Ишлинский А.Ю. Осесимметричная задача пластичности и проба Бриннеля // Прикладная математика и механика. 1944. Том 8. Вып. 3. С. 201–224.
3. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия: Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 510 с.
4. Котов В.Л., Брагов А.М., Баландин Вл.В., Баландин Вл.В., Линник Е.Ю. Применение модели локального взаимодействия для определения силы сопротивления внедрению ударников в песчаный грунт // Прикладная механика и техническая физика. 2013. Том. 54. № 4. С. 114–125.
5. Баженов В.Г., Баландин В.В., Григорян С.С., Котов В.Л. Анализ моделей расчета движения тел вращения минимального сопротивления в грунтовых средах // Прикладная математика и механика. 2014. Т. 78. Вып. 1. С. 98–115.
6. Брагов А.М., Баландин Вл.В., Баландин Вл.В., Котов В.Л. Экспериментальное изучение динамики проникания твердого тела в грунтовую среду // Журнал технической физики. 2016. Том 86. Вып. 6. С. 62–70.

7. ГОСТ 10704-91. Трубы стальные электро-стальные прямошовные.
8. ГОСТ 9012-59. Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю.
9. Баландин Вл.В., Баландин Вл.Вл., Брагов А.М., Котов В.Л. Экспериментальное изучение динамики проникания твердого тела в грунтовую среду // Журнал технической физики. 2016. Том 86. Вып. 6. С. 62–70.
10. Bragov A.M., Balandin V.V., Igumnov L.A., Kotov V.L., Kruszka L., Lomunov A.K. Impact and penetration of cylindrical bodies into dry and water-saturated sand // International Journal of Impact Engineering. 2018. V. 122. P. 197–208.

Об авторах

Шамгунов Риф Файзелхакович – кандидат технических наук, начальник бюро гидравлических систем Акционерного общества «Нижегородский завод 70-летия Победы», Нижний Новгород, Российская Федерация.

Область научных интересов: гидромеханика.

Игумнов Леонид Александрович – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, профессор Федерального государственного автономного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», Нижний Новгород, Российская Федерация.

Область научных интересов: теоретическая и экспериментальная механика.

Жегалова Ксения Петровна – аспирант Федерального государственного автономного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», Нижний Новгород, Российская Федерация.

Область научных интересов: механические испытания.

Котов Василий Леонидович – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, профессор Федерального государственного автономного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», Нижний Новгород, Российская Федерация.

Область научных интересов: вычислительная математика и механика геоматериалов и пористых сред.

Метрикин Владимир Семенович – кандидат физико-математических наук, доцент Федерального государственного автономного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», Нижний Новгород, Российская Федерация.

Область научных интересов: механика (прочность, динамика, ресурс).

Казаков Дмитрий Александрович – кандидат технических наук, заведующий лабораторией Научно-исследовательского института механики Федерального государственного автономного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», Нижний Новгород, Российская Федерация.

Область научных интересов: физико-механические испытания материалов.

Experimental study and mathematical modelling of the interaction between the hemispherical bottom of a container with cohesive soil

Shamgunov R. F.¹, Igumnov L. A.², Zhegalova K. P.², Kotov V. L.²,
Metrikin V. S.², Kazakov D. A.²

¹ 70th anniversary of Victory Nizhny Novgorod Plant, Nizhny Novgorod, Russian Federation

² Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (UNN), Nizhny Novgorod, Russian Federation

The object of this study was a product (container) for air defence systems. Experimental and computational studies of the processes of force interaction of a solid body, modelling the bottom of a container, with silt-loam soils of different moisture were carried out in order to assess the parameters of the interaction between the container and the soil. It is shown that the developed empirical model of soil penetration, which assumes constant stress on the indenter-soil contact surface, is suitable for describing the obtained experimental data.

Keywords: air defence products, container bottom, mathematical models, solid body–soil interaction, soil, backfill ring

Information about the authors

Shamgunov Rif Fayzelkhovich – Cand. Sci. (Engineering), Head of the Bureau of Hydraulic Systems of the 70th anniversary of Victory Nizhny Novgorod Plant, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Research interests: hydromechanics.

Igumnov Leonid Aleksandrovich – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (UNN); Chief Researcher, Research Institute of Mechanics, Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (UNN), Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Research interests: theoretical and experimental mechanics.

Zhegalova Ksenia Petrovna – Postgraduate student, Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (UNN), Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Research interests: mechanical testing.

Kotov Vasily Leonidovich – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (UNN); Chief Researcher, Research Institute of Mechanics, Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (UNN), Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Research interests: computational mathematics and mechanics of geomaterials and porous media.

Metrikin Vladimir Semenovich – Cand. Sci. (Engineering), Assoc. Prof., Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (UNN), Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Research interests: mechanics (strength, dynamics, resource).

Kazakov Dmitry Alexandrovich – Cand. Sci. (Engineering), Laboratory Head, Research Institute of Mechanics, Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (UNN), Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Research interests: physical and mechanical testing of materials.