

А.Н. Попов¹, М.Н. Полищук², Д.В. Решетов³

АНАЛИЗ КОМПОНОВОК ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ УДАРНЫХ СТЕНДОВ



¹Аркадий Николаевич Попов,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (921)947-3582, E-mail: porka.n@mail.ru



²Михаил Нусимович Полищук,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (911)242-2526, E-mail: polishchuck@mail.ru



³Дмитрий Валентинович Решетов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (981)876-95-81, E-mail: pvclol@yandex.ru

Аннотация

Ударные стенды используются для испытания различного оборудования подверженного ударным нагрузкам в процессе эксплуатации, транспортировки или вследствие форс-мажорных обстоятельств, например, при случайном падении, которое для оборудования или объекта недопустимо. После такого падения может произойти пролив активной жидкости, пожар или другое негативное воздействие на окружающую среду.

Для проведения испытаний на ударное воздействие используются различные типы оборудования, существенно отличающиеся по воспроизводимым пиковым ударным ускорениям, длительностям и формам импульсов. Большое разнообразие испытуемых объектов, различающихся по габаритам, массе и геометрической форме, привело к множеству конструктивных решений ударных машин. Наибольшее распространение получили вертикальные стенды, в которых вектор

ударных ускорений параллелен вектору силы тяжести. В таких стендах происходит накопление энергии вследствие подъема испытуемого объекта на необходимую высоту с последующим свободным или ускоренным падением за счет использования разгонных устройств. Для ряда объектов применение вертикальных стендов является невозможным. Причиной этого становятся два фактора. Первый обусловлен требованием симуляции реальных условий эксплуатации, когда вектор силы тяжести перпендикулярен вектору ударных ускорений. Вторым фактором являются большие габариты объектов испытаний, приводящие к конструктивной нерациональности построения вертикальных стендов. В работе рассмотрены различные варианты компоновки горизонтальных ударных стендов с точки зрения их структуры и импульсного воздействия на окружающее цеховое оборудование, приведен их сравнительный анализ.

Ключевые слова: горизонтальный ударный стенд, компоновка, станина, каретка, инерционный блок, подвеска, фундамент.

Введение

Механические испытания относятся к одному из распространенных видов испытаний наряду с климатическими, термическими, радиационными и прочими испытаниями [1–3]. Одним из видов механических факторов является ударное воздействие. Испытания на удар, как правило, проводятся в соответствии со стандартами [4, 5] и выполняются на ударных и вибрационных стендах. Массивные и крупногабаритные объекты испытываются в основном на ударных стендах [6–8]. Принципы работы и технические решения ударных стендов известны и подробно описаны в литературе [9–14].

Горизонтальные ударные стенды предназначены для испытания крупногабаритных объектов, являются, как правило, уникальными испытательными комплексами и распространены существенно меньше вертикальных ударных стендов. Их уникальность и высокая стоимость привела к различным техническим решениям в части, касающейся компоновки и конструктивного исполнения.

Первая технология горизонтальных ударных испытаний появилась в 70-е годы 20-го столетия в США в виде краш-тестов автомобилей согласно New Car Assessment Program (сейчас NHTSA, National Highway Traffic Safety Administration). В дальнейшем она распространилась в Европе в виде Euro NCAP (European New Car Assessment Programme [15]).

Потребности в испытаниях на горизонтальных стендах привели к быстрому расширению их разнообразия. В настоящее время горизонтальные ударные стенды для испытания широкой гаммы объектов, включая автомобили и автомобильные компоненты, выпускаются целым рядом компаний, таких как Seattle Safety, M/RAD Corporation и Lansmont

(США) [16, 17], DONGLING Technologies, SME Technology Co и TMC Solutions (КНР) [18], IndiaMART (Индия), ООО Вибросервистест, ВИС-В (РФ) и др.

Значительные разгонные усилия (до 3000 кН) и большие ударные импульсы приводят к появлению реактивных сил, которые воспринимаются несущей конструкцией стендов и передаются на силовой цеховой пол или фундамент. Вместе с тем, в технических характеристиках стендов реактивные силы, как правило, не указываются, а требования к монтажным поверхностям не приводятся. Важно, что монтаж ударного стенда на пол без учета динамической нагрузки, возникающей при его работе, может привести к негативному воздействию на здание. Производители стендов для уменьшения такого воздействия используют демпферы (амортизаторы) и пневматическую подвеску в различных сочетаниях, а в строительных нормах и правилах (СНиП) есть рекомендации по требованиям к фундаментам машин с динамическими нагрузками (СП 26.13330.2012, СНиП 2.02.05-87) [19, 20]. При этом одним из основных требований к основаниям, в нашем случае станинам, и фундаментам является предельная амплитуда их колебаний, которая, как правило, лежит в диапазоне от пяти сотых до десятых долей миллиметров, но не должна превышать 0,3 мм.

Цель исследования. Выявить типовые компоновки горизонтальных ударных стендов, дать их описание и провести сравнительный анализ.

Методы

Одной из самых простых является схема ударного стенда, показанная на рис. 1.

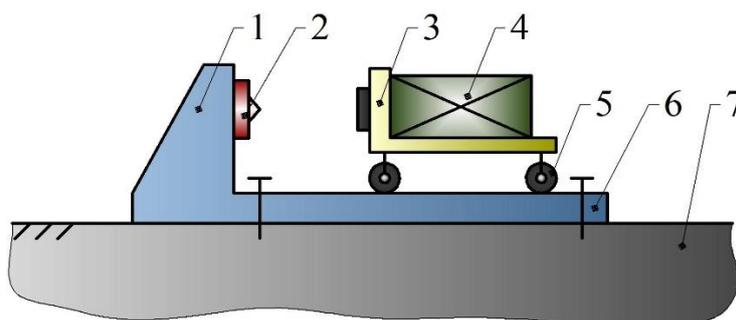


Рис. 1. Схема монтажа ударной машины на силовой пол:

1 – станина, 2 – формирователь импульса, 3 – каретка, 4 – объект испытаний,
5 – направляющие каретки, 6 – анкер крепления к полу, 7 – цеховой пол

Согласно инженерной практике, при соотношении подвижной массы каретки 3 с объектом испытаний 4 и массы станины 1 около 1:20 и более и при ограничениях на пиковое ударное ускорение, ударная машина с помощью анкеров 6 может монтироваться непосредственно на силовой

цеховой пол 7. В этом случае демпфирование ударного импульса осуществляется большой массой станины.

В случае, когда не удастся выдержать необходимое соотношение подвижной части и массы станины прибегают к установке ударной машины на массивный фундамент (рис. 2).

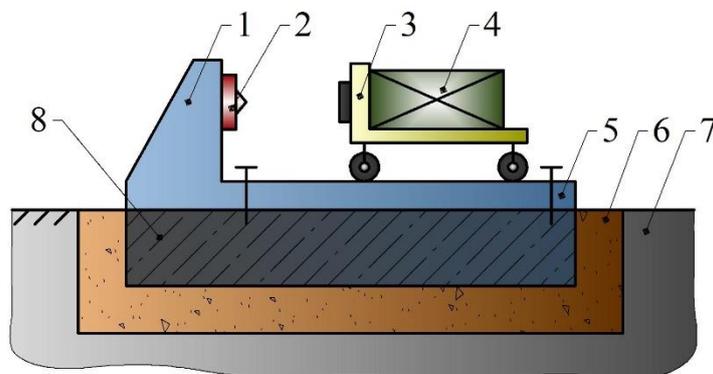


Рис. 2. Схема монтажа ударной машины на массивный фундамент:
 1 – станина, 2 – формирователь импульса, 3 – каретка, 4 – объект испытаний,
 5 – анкер крепления станины к фундаменту, 6 – строительная засыпка,
 7 – цеховой пол, 8 – железобетонный фундамент

Строительство массивных фундаментов возможно в том случае, когда ударная машина устанавливается в новом здании, в котором заранее под нее была предусмотрена необходимая площадка. В случае монтирования ударной машины в уже существующем помещении прибегают к схеме 3, показанной на рис. 3.

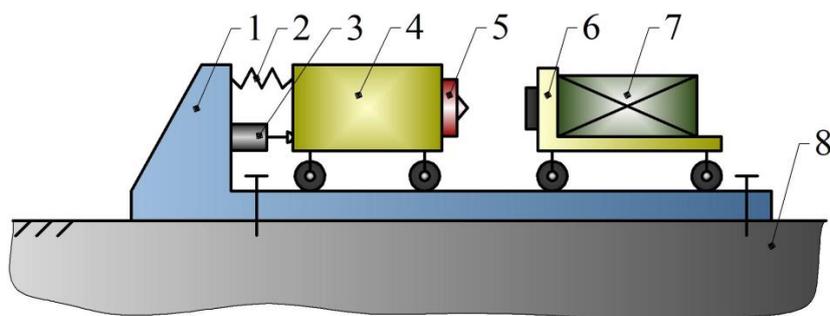


Рис. 3. Схема ударной машины с горизонтальной компоновкой инерционного блока:
 1 – станина, 2 – пневматическая пружина, 3 – гидравлический демпфер,
 4 – инерционный блок, 5 – формирователь импульса, 6 – каретка,
 7 – объект испытаний, 8 – цеховой пол

Схема получила название бесфундаментной, поскольку, как и в случае схемы 1, позволяет установить машину непосредственно на силовой цеховой пол. При этом не следует считать, что на пол ударные нагрузки не передаются. Фактически при отработке удара на пол передается несколько импульсов. Первый – в виде реакции, возникающей при разгоне каретки,

второй – после удара и отскока каретки с последующим торможением за счет внешних сил, третий – при торможении инерционного блока за счет пружины 2 и демпфера 3. Из трех импульсов нас больше интересует тот, который определяет параметры инерционного блока, т. е. его массу, настройку пружины 2 и демпфера 3.

Схема 3 может быть трансформирована в схему 4, когда инерционный блок располагается под кареткой (рис. 4). Такая компоновка позволяет уменьшить размер ударного стенда по горизонтали в случае, если в цеховом помещении недостаточно места, при этом она обладает всеми преимуществами схемы 3.

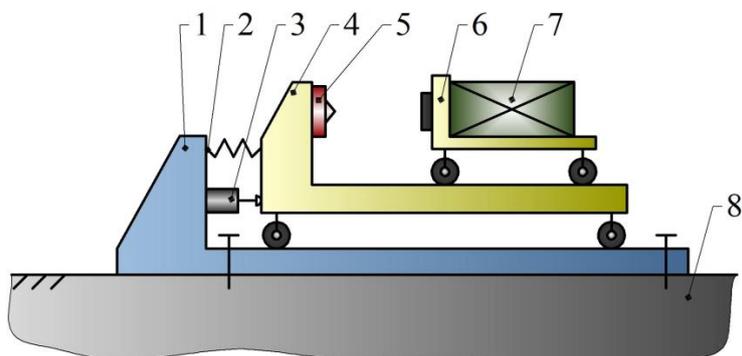


Рис. 4. Схема ударной машины с вертикальной компоновкой инерционного блока:
1 – станина, 2 – пневматическая пружина, 3 – гидравлический демпфер,
4 – инерционный блок, 5 – формирователь импульса, 6 – каретка,
7 – объект испытаний, 8 – цеховой пол

Известно, что реализация поступательных направляющих сложнее и дороже вращательных. В связи с этим схема 4 может быть преобразована и выполнена на вращательной кинематической паре 9 (рис. 5, а).

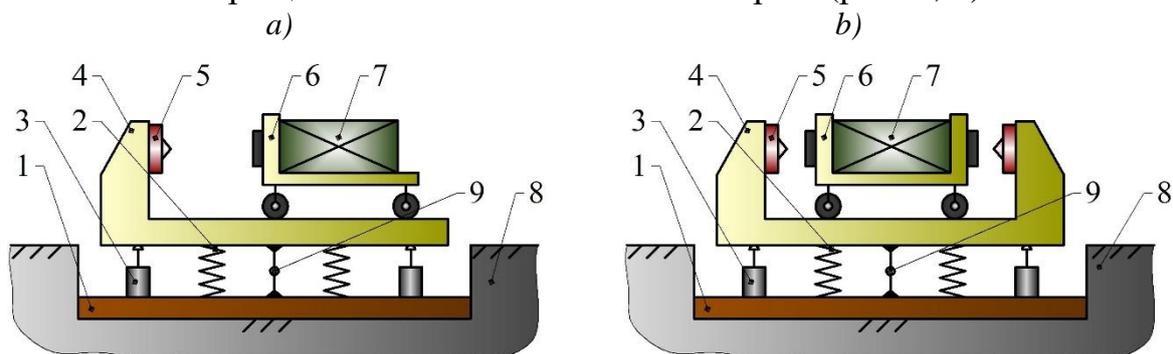


Рис. 5. Схема ударной машины с качающимся инерционным блоком:
а) – с односторонним воспроизведением удара, б) – с двухсторонним ударом;
1 – опора для пружин и демпферов, 2 – пневматическая пружина,
3 – гидравлический демпфер, 4 – качающийся инерционный блок,
5 – формирователь импульса, 6 – каретка, 7 – объект испытаний, 8 – цеховой пол,
9 – опорный шарнир

Качающийся инерционный блок в совокупности с пружинами и демпферами позволяет уменьшить динамические нагрузки на цеховой пол и перевести их из горизонтальной плоскости в вертикальную. Схема с шарниром делает компоновку симметричной с точки зрения возможности создания положительных и отрицательных ускорений, действующих на объекты испытаний. Такая компоновка ударной машины показана на рис. 5, *b*. Схема дает еще один положительный эффект, связанный с тем, что и сама каретка с объектом испытаний начинает играть роль инерционного блока, совершая качательное движение вместе с ним.

Главным недостатком схем 5, *a* и 5, *b* является наличие центрального шарнира, который при значительной массе в случае испытания крупногабаритных объектов становится высоконагруженным и неудачно расположенным с точки зрения его обслуживания. В известной мере этого недостатка лишена схема, показанная на рис. 6.

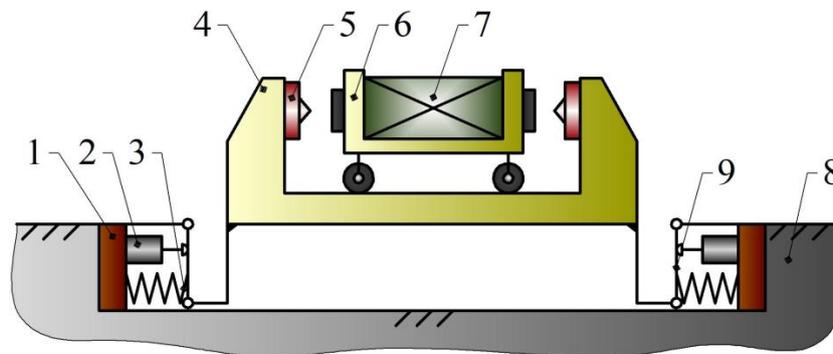


Рис. 6. Схема ударной машины с параллелограммным механизмом:

- 1 – опора для пружин и демпферов, 2 – гидравлический демпфер,
 3 – пневматическая пружина, 4 – инерционный блок, 5 – формирователь импульса,
 6 – каретка, 7 – объект испытаний, 8 – цеховой пол, 9 – серьга параллелограммного механизма

Здесь инерционный блок 4 подвешен на рычагах 9, которые образуют пространственный параллелограммный механизм. Согласно схеме инерционный блок будет совершать плоскопараллельное движение со смещением по вертикали. Таким образом, здесь обеспечивается дополнительный эффект демпфирования удара за счет перехода кинетической энергии в потенциальную энергию подъема всего механизма. Аналогично схеме 5 каретка с объектом испытаний также участвует в демпфировании удара, поскольку совершает движение вместе с инерционным блоком.

Результаты

Значительный интерес представляет сравнение различных компоновок горизонтальных ударных стендов, прежде всего исходя из требуемой скорости каретки в момент соударения с формирова­телем для получения необходимого пикового ударного ускорения и длительности импульса. Такое сравнение может быть выполнено на основе анализа динамики процесса удара путем математического моделирования.

Из шести нашедших конструктивную реализацию компоновок выделим базовые схемы, объединяющие свойства рассмотренных схем, для которых целесообразно построить математические модели и в последующем выполнить сравнительный анализ. Остановимся на трех компоновках, выполненных по схемам 1, 3 и 6.

Для схемы 1 имеем следующую упрощенную модель:

$$m\ddot{x} + cx = 0, \quad \dot{x}(0) = v, \quad (1)$$

где x – координата каретки; m – масса каретки; c – жесткость формирова­теля; v – скорость каретки в момент соударения с формирова­телем.

Решая уравнение (1), находим параметры ударного импульса, пиковое значение A , длительность τ и максимальное значение нагрузки на опоры F :

$$A = v\sqrt{\frac{c}{m}}, \quad \tau = \pi\sqrt{\frac{m}{c}}, \quad F = v\sqrt{cm}. \quad (2)$$

Из (2) определяем для схемы 1 характеристики, обеспечивающие воспроизведение ударного импульса с требуемыми значениями амплитуды и длительности:

- жесткость формирова­теля – по требуемой длительности импульса

$$c = m\left(\frac{\pi}{\tau}\right)^2; \quad (3)$$

- скорость соударения – по требуемому пиковому значению импульса

$$v = \frac{A\tau}{\pi}. \quad (4)$$

Математическая модель для схемы 3 имеет вид:

$$\begin{cases} m\ddot{x}_1 = -c(x_1 - x_2), \\ M\ddot{x}_2 = c(x_1 - x_2) - c_0x_2 - \beta_0\dot{x}_2, \end{cases} \quad \begin{cases} x_1(0) = 0, & \dot{x}_1(0) = v; \\ x_2(0) = 0, & \dot{x}_2(0) = 0, \end{cases} \quad (5)$$

где x_1, x_2 – координаты каретки и инерционного блока; M – масса инерционного блока; c_0 – жесткость пружины; β_0 – коэффициент демпфирования. Остальные параметры совпадают с введенными в (1).

Систему (5) также можно решить аналитически, но получаемые выражения довольно громоздки. Удобнее ограничиться приближенными оценками [13]:

– жесткость формователя

$$c = \frac{mM}{m+M} \left(\frac{\pi}{\tau} \right)^2; \quad (6)$$

– скорость соударения

$$v = \frac{m+M}{M} \cdot \frac{A\tau}{\pi}. \quad (7)$$

Эти оценки отличаются от (3), (4). Значительную роль в них играет масса инерционного блока, а вернее соотношение между массами каретки и инерционного блока.

Математическая модель для схемы 6 при малом значении угла качания серег α имеет вид:

$$\begin{cases} m\ddot{x} + m\ddot{\alpha}\Delta + cx = 0 \\ \frac{1}{\Delta} m\ddot{x} + (m+M)\ddot{\alpha} + 2\beta_0\dot{\alpha} + ((m+M)g + 2c_0)\alpha = 0 \end{cases} \quad (8)$$

где α – угол качания серег, x – линейное перемещение каретки относительно инерционного блока; Δ – длина серег; g – ускорение свободного падения.

Система уравнений (8) в связи со сложным движением инерционного блока и с совместным движением инерционного блока и каретки, а также относительным движением каретки получила существенно более сложный вид по отношению к (5).

Обсуждение

Выявленные базовые схемы компоновок горизонтальных ударных машин и приведенные математические модели позволяют в дальнейшем провести численные оценки потребных скоростей соударения для достижения необходимых пиковых ударных ускорений и длительностей. В результате могут быть получены сравнительные численные оценки компоновок. При этом наибольший интерес представляют оценки для маятниковой компоновки 6, которая имеет по отношению к остальным схемам дополнительный демпфирующий эффект. Численная оценка этого эффекта может быть использована для определения границ применения маятниковой схемы.

Заключение

Продолжение работы может предполагать развитие выше предложенной математической модели, заключающееся в учете особенностей приводной системы разгона каретки и получении зависимостей, определяющих оптимальные технические параметры элементов в составе машины применительно к данной схеме компоновки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Евграфов А.Н., Каразин В.И., Хлебосолов И.О. О разработках градуировочной и испытательной техники. Труды СПбГПУ, 2007, № 504, С. 217.
- [2] Каразин В.И., Хлебосолов И.О., Евграфов А.Н., Козликин Д.П., Андриенко П.А., Терешин В.А., Хисамов А.В. Методы и средства лабораторного воспроизведения ускорения. СПб, Изд-во СПбПУ Петра Великого, 2023, 168 с.
- [3] Christian Lalanne. Mechanical Shock: monograf. ISTE Ltd and John Wiley&Sons Inc, 2009. – 367 p.
- [4] ГОСТ РВ 20.57.305-98. М., Стандартиформ, 1998. – 53 с.
- [5] ГОСТ Р ИСО 8568-2010. Стенды ударные. Заявление и подтверждение характеристик. М., Стандартиформ, 2011. – 23 с.
- [6] Harris C.M., Piersol A.G. Harris' Shock and Vibration Handbook. 5-th Edition. McGraw-Hill Professional, 2002. – 1457 p.
- [7] Vit Babuška, Carl Sisemore. The Science and Engineering of Mechanical Shock – Springer Nature Switzerland AG, 2020. – 369 p.
- [8] Yi T., Jin C., Hong J., Liu Y. (2022). Layout analysis of compressed air and hydraulic energy storage systems for vehicles. *Advances in Mechanical Engineering*, 14(1).
- [9] Bin W., Chengwu L., Jingjing W. (2017). The optimized algorithm for working parameters of the vertical impact testing machine. Paper presented at the ICEMI 2017 - Proceedings of IEEE 13th International Conference on Electronic Measurement and Instruments, 2018-January, pp. 424-430.
- [10] Polishchuck M.N., Popov A.N., Reshetov D.V. Mathematical model of shock machine. *Advances in Mechanical Engineering, LNME*, pp. 86–96, 2022.
- [11] Polishchuck M.N., Popov A.N., Vasiliev A.K., Reshetov D.V. Research of Air Suspension of Shock Machine. *Advances in Mechanical Engineering, LNME*, 2021, pp. 219–230.
- [12] Попов А.Н., Полищук М.Н., Решетов Д.В. Моделирование работы горизонтального ударного стенда. Современное машиностроение.

- Наука и образование. – 2023. – №. 12. – С. 336-349. – DOI 10.18720/SPBPU/2/id23-543.
- [13] Попов А.Н., Полищук М.Н., Решетов Д.В. Горизонтальный ударный стенд. // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2023. – №. 12. – С. 324-335. – DOI 10.18720/SPBPU/2/id23-542.
- [14] Rastegar J. A new class of high-G and long-duration shock testing machines. Paper presented at the Proceedings of SPIE - the International Society for Optical Engineering, p. 10602.
- [15] Website of The European New Car Assessment Programme: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.euroncap.com/en>. (Accessed: 10.04.2024).
- [16] Website of National Highway Traffic Safety Administration: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nhtsa.gov>. (Дата обращения: 10.04.2024).
- [17] ServoSled Catapult Sled Systems: [Электронный ресурс]. URL: <https://seattlesafety.com/wp-content/uploads/2020/04/ServoSled-Brochure-2020-04-17.pdf>. (Дата обращения: 10.04.2024).
- [18] Website of Dongling. [Electronic resource]. URL: <http://donglingtest.ru/3-3-shock-test-machine/162322/> (Дата обращения: 10.04.2024).
- [19] Свод правил СП 26.13330.2012. Фундаменты машин с динамическими нагрузками. Москва, Стандартинформ, 2001. – 70 с.
- [20] СНиП 2.02.05-87. Фундаменты машин с динамическими нагрузками. Москва: Госстрой СССР, 1988. – 32 с.

A.N. Popov, M.N. Polishchuck, D.V. Reshetov

ANALYSIS OF HORIZONTAL SHOCK MACHINES LAYOUTS

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

Shock machines are used to test various equipment to shock loads during operation, transportation or due to force-majeure circumstances, for example, the accidental freefall, which is unacceptable for the equipment or object. After such fall, a spill of active liquid, fire or other negative impacts on the environment may occur.

Shock testing uses different types of equipment, which differ significantly in the reproducible peak impact accelerations, pulse durations and pulse shapes. The wide variety of test objects, varying in size, weight, and geometric shape, led to a variety of design solutions for impact machines. The most widespread

are vertical stands, in which the vector of shock accelerations is parallel to the vector of gravity. In such machines, energy is accumulated due to the lifting of the test object to the required height, followed by a free or accelerated fall due to the use of accelerating devices. For a few objects, the use of vertical machines is impossible. The reason for this is two factors. The first is due to the requirement to simulate real operating conditions, when the gravity vector is perpendicular to the shock acceleration vector. The second factor is the large dimensions of the test objects, leading to the design irrationality of constructing vertical machines.

The paper examines various options for the layout of horizontal shock machines from the point of view of their structure and shock impact on the surrounding workshop equipment and provides a comparative analysis of them.

Key words: horizontal shock machine, layout, frame, carriage, inertial mass, suspension system, foundation.

REFERENCES

- [1] Evgrafov A.N., Karazin V.I., Khlebosolov I.O. On the development of rotary calibration and testing equipment (2007) Proceedings of St. Petersburg State Technical University, No. 504. P. 217.
- [2] Karazin V.I., Khlebosolov I.O., Evgrafov A.N., Kozlikin D.P., Andrienko P.A., Tereshin V.A., Khisamov A.V. Methods and means of laboratory reproduction of acceleration. St. Petersburg: POLYTECH-PRESS, 2023, 168 p.
- [3] Christian Lalanne. Mechanical Shock: monograf. ISTE Ltd and John Wiley&Sons Inc, 2009. – 367 p.
- [4] GOST RV 20.57.305-98. Comprehensive quality control system. Apparatus, instruments, devices, and equipment. Test methods for the impact of mechanical factors, Moscow, STANDARTINFORM Publ, 1998. – 53 p.
- [5] GOST R ISO 8568-2010. Shock stands. Statement and confirmation of characteristics. Moscow, STANDARTINFORM Publ, 2011. – 23 p.
- [6] Harris C.M., Piersol A.G. Harris' Shock and Vibration Handbook. 5-th Edition. McGraw-Hill Professional, 2002. – 1457 p.
- [7] Vit Babuška, Carl Sisemore. The Science and Engineering of Mechanical Shock – Springer Nature Switzerland AG, 2020. – 369 p.
- [8] Yi T., Jin C., Hong J., Liu Y. (2022). Layout analysis of compressed air and hydraulic energy storage systems for vehicles. *Advances in Mechanical Engineering*, 14(1).
- [9] Bin W., Chengwu L., Jingjing W. (2017). The optimized algorithm for working parameters of the vertical impact testing machine. Paper presented at the ICEMI 2017 - Proceedings of IEEE 13th International Conference on Electronic Measurement and Instruments, 2018-January, pp. 424-430.

- [10] Polishchuck M.N., Popov A.N., Reshetov D.V. Mathematical model of shock machine. *Advances in Mechanical Engineering*, LNME, pp. 86–96, 2022.
- [11] Polishchuck M.N, Popov A.N, Vasiliev A.K, Reshetov D.V. Research of Air Suspension of Shock Machine. *Advances in Mechanical Engineering*, LNME, 2021, pp. 219–230.
- [12] Popov, A. N., M. N. Polishchuk, D. V. Reshetov. Horizontal impact machine work simulation, // *Modern mechanical engineering. Science and education*. – 2023. – No. 12. – P. 336-349. – DOI 10.18720/SPBPU/2/id23-543.
- [13] Popov, A. N., M. N. Polishchuk, D. V. Reshetov Horizontal shock machine. *Modern mechanical engineering. Science and education*. – 2023. – No. 12. – P. 324-335. – DOI 10.18720/SPBPU/2/id23-542.
- [14] Rastegar J. A new class of high-G and long-duration shock testing machines. Paper presented at the Proceedings of SPIE - the International Society for Optical Engineering, p. 10602.
- [15] Website of The European New Car Assessment Programme: [Electronic resource]. URL: <https://www.euroncap.com/en>. (Accessed: 10.04.2024).
- [16] Website of National Highway Traffic Safety Administration: [Electronic resource]. URL: <https://www.nhtsa.gov>. (Accessed: 10.04.2024).
- [17] ServoSled Catapult Sled Systems: [Electronic resource]. URL: <https://seattlesafety.com/wp-content/uploads/2020/04/ServoSled-Brochure-2020-04-17.pdf>. (Accessed: 10.04.2024).
- [18] Website of Dongling. [Electronic resource]. URL: <http://donglingtest.ru/3-3-shock-test-machine/162322/> (Accessed: 10.04.2024).
- [19] SP 26.13330.2012 Foundations of machines with dynamic loads. Moscow, STANDARTINFORM Publ, 2001. – 70 p.
- [20] SNiP 2.02.05-87 Foundations of machines with dynamic loads. Moscow: CITP Gosstroy USSR, 1988. – 32 p.