



**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ГРАВИТАЦИОННОГО ПНЕВМОУДАРНОГО УСТРОЙСТВА  
ДЛЯ ОБРАЗОВАНИЯ ДЕГАЗАЦИОННЫХ СКВАЖИН**

**П. Н. Тамбовцев**

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: tambovskiy@mail.ru,  
Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

Для образования дегазационных скважин угольных пластов обоснована конструктивная схема гравитационного пневмоударного устройства, обеспечивающего эффективное погружение обсадных труб в грунтовый массив. Методом численного моделирования исследована динамика его рабочего цикла, установлены рациональные конструктивные параметры, определены значения энергии и частоты ударов, расхода сжатого воздуха в зависимости от величины давления сжатого воздуха в магистрали. Проведена сравнительная оценка массогабаритных и динамических характеристик гравитационного устройства с известными аналогами.

*Грунтовый массив, обсадка дегазационных скважин, стальные трубы, пневмоударная машина, энергия удара, расход воздуха, параметры рабочего цикла*

**DYNAMICS OF PNEUMATIC-GRAVITATIONAL PERCUSSION MECHANISM  
FOR DEGASSING HOLE-MAKING**

**P. N. Tambovtsev**

*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
E-mail: tambovskiy@mail.ru, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

A schematic design of the pneumatic-gravitational percusion mechanism ensuring efficient driving of casing pipes in soil for degassing hole-making in coal seams, is substantiated. Using the numerical modeling method, the operating cycle dynamics of the mechanism is studied, with its rational design parameters calculated. The basic energy parameters, percusion frequency and compressed air flow depending on the compressed air pressure in the main line are determined. The comparative assessment of the weight, size and dynamic parameters of the gravitational machine and the known analogs is performed.

*Soil, casing of degassing holes, steel pipes, pneumatic percusion machine, blow energy, air flow rate, operating cycle parameters*

Дегазация угольных пластов осуществляется через скважины, формируемые с поверхностного слоя грунта в угольный массив [1]. Скважины образуют бурением с одновременной или последующей обсадкой их трубами и цементированием стенок скважины в затрубной полости. Для повышения экономической эффективности технологии дегазации угольных пластов в ИГД СО РАН предложены технико-технологические решения, заключающиеся в образовании скважин в приповерхностном слое массива путем виброударного продавливания стальной трубы с одновременным удалением грунта из ее полости на поверхность. Схема реализации такой технологии заключается в последовательном погружении в грунт стальных труб диаметром от 219 до 426 мм ударным устройством [2]. Грунт из трубы удаляется давлением сжатого воздуха, подведенного по каналу к забойной торцевой части трубы (рис. 1а). Глубина погружения труб не менее 40 м. Рассматриваемая технология предусматривает погружение обсадных труб в безкопровой варианте. Порядок проведения работ по вертикальному погружению труб ударным способом состоит из следующих этапов: монтаж технологической оснастки для вытеснения

сжатым воздухом грунтового керна из полости погружаемой трубы; соединение трубы с ударной машиной через переходник и канатная привязка машины к трубе; подъем средствами механизации в вертикальное положение машины с трубой и установка ее в рабочее положение перед погружением; запуск ударной машины и погружение трубы в грунт; периодическое удаление потоком сжатого воздуха грунтового керна из полости трубы при ее погружении. Для ускорения внедрения этого метода необходимо разработать простейшее и эффективное техническое средство ударного действия.

В настоящее время в горнодобывающей и строительной отрасли для разрушения горных пород, внедрения строительных элементов в грунт используют ударные машины с гидравлическим, электрическим и пневматическим приводами [3–5]. Ударные машины с пневмоприводом отличаются простотой конструкций и надежностью в эксплуатации. В строительстве вертикальное погружение в грунт стальных труб диаметром до 426 мм на глубину до 15–20 м осуществляют пневмомолотами двойного действия (Тайфун-500, М-400) с энергией удара до 4000 Дж. Ранее эти машины хорошо себя зарекомендовали для горизонтального погружения в грунт стальных труб диаметром до 1020–1220 мм [6]. При эффективном вертикальном погружении труб в грунтовой массив на глубину свыше 40 м требуется более высокая энергия удара (до 8 кДж), что обусловлено повышением плотности грунта с увеличением глубины внедрения трубы. Опыт испытаний пневмоударных машин двойного действия показал, что в процессе вертикального забивания труб работу может существенно осложнить действие реактивных сил отдачи корпуса ударной машины, приводящее к ослаблению жесткого соединения машины с трубой, при этом снижается эффективность забивания труб и безопасность ведения работ. Исключить реактивные силы отдачи корпуса ударной машины возможно, если использовать в ее конструкции гравитационный ударный механизм.

В качестве решения поставленной задачи предлагается использовать гравитационный пневмоударный механизм с клапанным воздухораспределением. Компоновка такого устройства при соединении с трубами показана на рис. 1б, принципиальная схема конструкции — на рис. 2а.

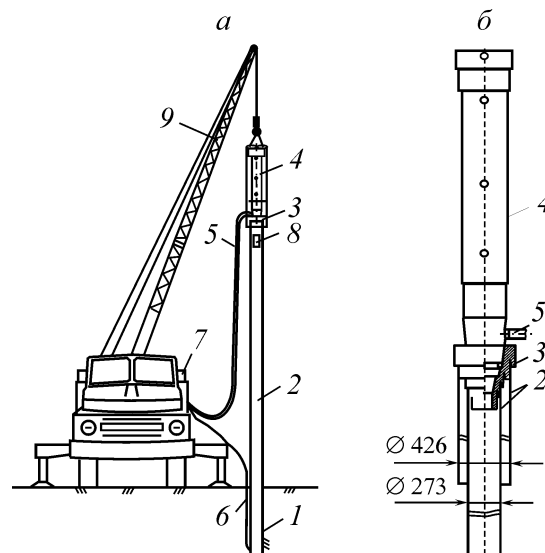


Рис. 1. Схема ударного погружения трубы (а) и компоновка ударного узла при соединении через переходник с трубами (б): 1 — грунт; 2 — труба; 3 — переходник; 4 — пневмоударный узел; 5 — магистраль; 6 — воздухоподводящий канал в полость трубы; 7 — компрессор; 8 — окно для удаления грунта; 9 — стрела крана

Работает устройство следующим образом. При его подключении сжатый воздух поступает в рабочую камеру 2 (рис. 2а) из магистрали через камеру 1 и отверстие в наковальне. Из нижнего положения под давлением воздуха ударник начинает движение вверх. При прохождении упругим клапаном 4 боковых отверстий корпуса происходит выхлоп воздуха из рабочей

камеры. Одновременно за счет перепада давления между камерами 1 и 2 пластинчатый золотник 5 перемещается вверх и перекрывает доступ сжатому воздуху в рабочую камеру. Далее ударник, делает обратный ход, за счет гравитации совершает прямой ход и наносит удар по наковальне 1 корпуса, жестко связанного с забиваемой трубой. Затем цикл повторяется.

Для установления работоспособности устройства, исследования особенностей рабочего цикла и эффективности его работы, определения рациональных конструктивных и динамических параметров разработана имитационная модель пневмоударного механизма, построенная с помощью компьютерной программы [7, 8]. В модель подставляли значения физических и конструктивных параметров (масса ударника, рабочая площадь ударника, объемы камер сжатого воздуха и т. д.) и при каждом наборе значений получали решение, представленное в виде диаграмм: давления, перемещения и скорости ударника, мгновенного расхода сжатого воздуха. Оценка эффективности рабочего цикла производилось в первую очередь по энергии удара (предударной скорости) и среднему расходу сжатого воздуха в установившемся режиме работы машины. При обработке диаграмм и определении количественных выходных характеристик рабочего цикла использовались формулы (1)–(5):

Энергия удара, Дж:

$$A = \frac{mv^2}{2}, \quad (1)$$

где  $m$  — масса ударника, кг;  $v$  — предударная скорость ударника, м/с.

Частота ударов, Гц:

$$f = \frac{1}{T_{\text{ц}}}, \quad (2)$$

где  $T_{\text{ц}}$  — период цикла, с.

Ударная мощность, Вт:

$$N = A \cdot f. \quad (3)$$

Абсолютный расход сжатого воздуха, м<sup>3</sup>/мин:

$$Q = \frac{60RT}{pT_{\text{ц}}} \int_0^{T_{\text{ц}}} G(t)dt, \quad (4)$$

где  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $T$  — абсолютная температура сжатого воздуха в магистрали;  $p$  — атмосферное давление.

Удельный расход, м<sup>3</sup>/Дж:

$$q = \frac{Q}{60N}. \quad (5)$$

При моделировании рабочего цикла ориентировались на диапазон значений заданных параметров: абсолютное давление в магистрали 0.6–1.2 МПа, энергия удара 4–8 кДж, скорость удара 4–6 м/с, масса ударника 600 кг, габаритный ход до 1400 мм, площадь магистрального канала 5.3–8.5 см<sup>2</sup>, диаметр корпуса до 400 мм. Схемы к расчету пневмоударного устройства изображены на рис. 2: конструктивная схема с указанием ее основных элементов (рис. 2а), обобщенная схема пневматических связей (рис. 2б), схема механических связей, определяющая характер силовых и ударных взаимодействий между подвижными элементами ( $m_1$ ,  $m_2$ ) и корпусом  $m_3$  (риса. 2в). На рис. 3 представлены характерные диаграммы рабочего цикла, соответствующие рациональным значениям конструктивных параметров:  $m_1 = 600$  кг,  $m_2 = 7$  кг,  $S_{21} = 583$  см<sup>2</sup>,  $S_{12} = S_{22} = 200$  см<sup>2</sup>,  $S_{41} = 779$  см<sup>2</sup>,  $J_{M0} = J_{01} = 5.3$  см<sup>2</sup> (8.5 см<sup>2</sup>),  $J_{4a} = 210$  см<sup>2</sup>,  $V_0 = 22670$  см<sup>3</sup>,  $V_1 = 5800$  см<sup>3</sup>,  $V_2 = 6690$  см<sup>3</sup>,  $V_3 = 2700$  см<sup>3</sup>. Диаграммы свидетельствуют об эффективном режиме работы устройства, поскольку наблюдается стабильный рабочий цикл, прямой ход ударника происходит за счет гравитации, обратный — за счет давления в рабочей камере, пластинчатый клапан срабатывает своевременно до начала выхлопа.

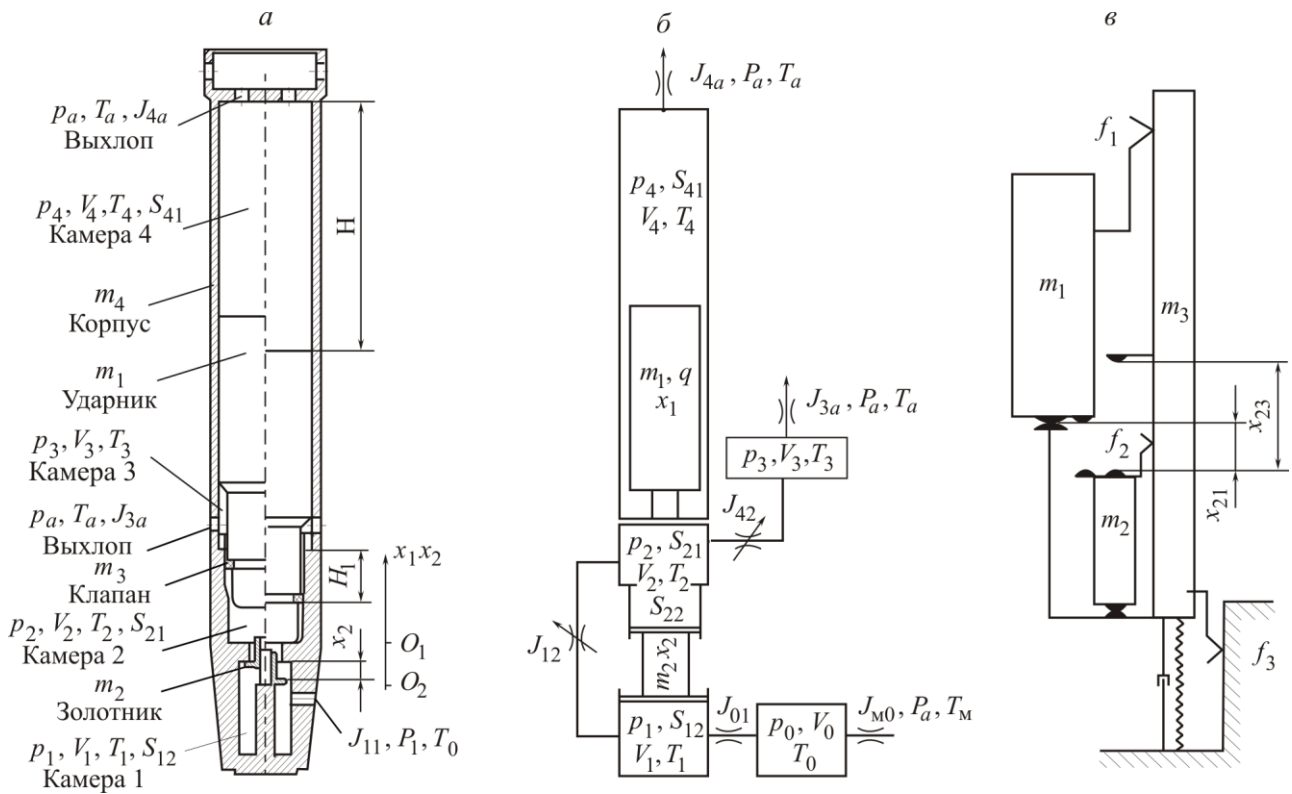


Рис. 2. Расчетные схемы пневмоударного механизма: *а* — конструктивная схема, *б* — схема пневматических связей, *в* — схема механических связей:  $V_i$  — объемы камер;  $J_i$  — площади воздухопроходных сечений;  $m_i$  — массы подвижных элементов;  $S_{ij}$  — эффективные площади масс  $m_i$  со стороны  $i$ -камер;  $T_i, T_M$  — абсолютная температура воздуха в  $i$ -камере, магистрали;  $p_m, p_i, p_a$  — абсолютное давление воздуха в магистрали,  $i$ -камере, атмосфере

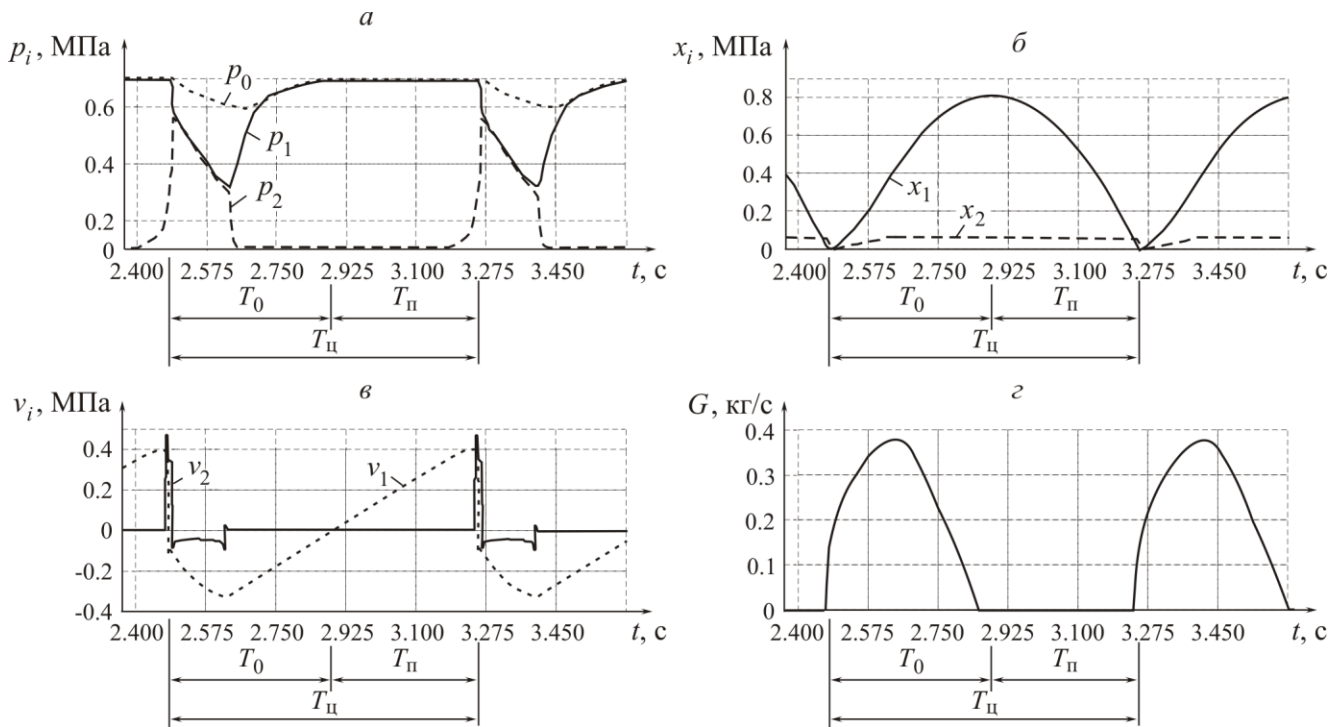


Рис. 3. Расчетные диаграммы рабочих циклов пневмоударной машины при магистральном давлении 0.6 МПа: *а* — изменения абсолютного давления сжатого воздуха по времени  $p_i(t)$  в  $i$ -камерах; *б* — перемещения ударника  $x_1(t)$  и золотника  $x_2(t)$ ; *в* — скорости ударника  $v_1(t)$  и золотника  $v_2(t)$ ; *г* — мгновенного расхода сжатого воздуха  $G(t)$ ;  $t$  — время, с;  $T_{ц}$  — период цикла;  $T_0$  — период обратного хода;  $T_{п}$  — период прямого хода

В табл. 1 приведены основные показатели рабочего цикла, снятые с диаграмм. Она показывает, что при давлении в магистрали от 0.6 до 1.2 МПа увеличиваются: период цикла — с 0.77 до 0.95 с, рабочий ход ударника — с 800 до 1370 мм, скорость ударника 3.86–5.35 м/с, абсолютный расход 6.3–7.8 м<sup>3</sup>/мин.

ТАБЛИЦА 1. Расчетные показатели рабочего цикла машины

Показатель	Значение			
	0.70	0.9	1.10	1.30
Давление изб $p$ , МПа	0.70	0.9	1.10	1.30
Период цикла $T_{\text{ц}}$ , с	0.77	0.82	0.87	0.95
Период обратного хода $T_{\text{о}}$ , с	0.40	0.41	0.44	0.50
Период прямого хода $T_{\text{п}}$ , с	0.37	0.39	0.41	0.45
Рабочий ход ударника $H_{\text{х}}$ , с	800	1000	1180	1370
Скорость удара $v$ , м/с	3.86	4.46	4.95	5.35
Абсолютный расход $Q$ , м <sup>3</sup> /мин	6.30	6.66	7.07	7.80

В табл. 2 представлены рассчитанные по формулам (1)–(5) технические характеристики гравитационной пневмоударной машины и паспортные технические характеристики известных аналогов — машин двойного действия, разработанных в ИГД СО РАН. В табл. 2 показано, что при изменении магистрального давления 0.6–1.2 МПа энергия удара гравитационного молота увеличивается с 4470 до 8587 Дж, расход — с 6.3 до 7.8 м<sup>3</sup>/мин, ударная мощность — с 5811 до 9016 Вт. Удельный расход составляет  $(13.9–18.0) \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/мин, частота ударов — 1.05–1.30 Гц. Пневмомолоты М-400, Тайфун-500 имеют близкие массогабаритные характеристики с гравитационной пневмоударной машиной, они работают при магистральном давлении 0.6 МПа. По удельному расходу и энергии удара они уступают новой гравитационной ударной машине. По ударной мощности гравитационная машина превосходит пневмомолоты Тайфун-500. При давлении 1.3 МПа ударная мощность гравитационной машины сопоставима с мощностью пневмомолота М-400 за счет высокой энергии удара, при этом гравитационный молот имеет в 2.5 раза меньший абсолютный расход сжатого воздуха (7.8 м<sup>3</sup>/мин), что на практике существенно повышает конкурентоспособность гравитационной машины.

ТАБЛИЦА 2. Технические характеристики пневмоударных машин

Показатель	Гравитационная пневмоударная машина (расчетные данные)				Пневмомолот (паспортные данные)		
					М-400	Тайфун-500	Тайфун-740
Давление изб. $p$ , МПа	0.6	0.8	1.0	1.2	0.6	0.6	0.6
Энергия удара $A$ , Дж	4470	5968	7351	8587	3700	4000	6000
Частота ударов $f$ , Гц	1.3	1.22	1.15	1.05	2.8	1.16	1.00
Расход воздуха $Q$ , м <sup>3</sup> /мин	6.30	6.66	7.07	7.80	20	6	8.00
Мощность $N$ , Вт	5812	7280	8453	9016	10360	4640	6000
Удельный расход $q$ , м <sup>3</sup> /Дж	$18.0 \times 10^{-6}$	$15.2 \times 10^{-6}$	$13.9 \times 10^{-6}$	$14.4 \times 10^{-6}$	$32.2 \times 10^{-6}$	$21.0 \times 10^{-6}$	$22.2 \times 10^{-6}$
Масса ударника $m$ , кг	600	600	600	600	—	500	740
Масса машины $M$ , кг	1710	1710	1710	1710	1800	1350	1750
Габариты, мм:							
длина	3290	3290	3290	3290	2590	2000	2650
диаметр	448	448	448	448	470	400	400

## ВЫВОДЫ

Для реализации технологии образования дегазационных скважин целесообразно использовать гравитационную пневмоударную машину, обеспечивающую погружение обсадных труб с высокой энергией удара при экономичном расходе сжатого воздуха. Создание нового опытного образца гравитационного пневмомолота и его натурные испытания дают возможность доста-

точно оценить конкурентоспособность новой гравитационной машины. Результаты численного моделирования рабочего цикла гравитационной машины с клапанным воздухораспределением показали, что при сравнении с известными аналогами — пневмоударными машинами двойного действия — гравитационная машина не уступает им по своим энергетическим показателям. Таким образом, создание и внедрение новой гравитационной машины позволит повысить производительность погружения стальных труб и снизить энергетические затраты на реализацию технологического процесса.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Mametev L. E., Khoreshok A. A., Tsekhin A. M., and Borisov A. Yu.** Increasing the efficiency of drilling degassing wells and transportation of broken coal, Newsletter KuzGTU, 2018, vol. 1, pp. 106–112 (in Russian) [**Маметьев Л. Е., Хорешок А. А., Цехин А. М., Борисов А. Ю.** Повышение эффективности бурения дегазационных скважин и транспортирования разрушенного угля // Вестник КГУ. — 2018. — № 1. — С. 106–112.]
2. **Kondratenko A. S. and Shakhtorin I. O.** Engineering solutions on simultaneous drilling and casing for preliminary degasification of coal seams, Fundamental and Applied Mining Science, 2018, vol. 5, no. 1, pp. 252–256 (in Russian) [**Кондратенко А. С., Шахторин И. О.** Разработка технических решений бурения скважин с одновременной обсадкой для предварительной дегазации угольных пластов // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2018. — Т. 5. — № 1. — С. 252–256.]
3. **Wu T., Tang Y., Tang S., Li Y., He W., and Chen E.** Design and analysis of a new down-the-hole electromagnetic hammer driven by tube linear motor, 2017. IET Electric Power Applications, 11(9), 1558–1565. DOI: 10.1049/iet-epa.2017.0208.
4. **Wittig V., Bracke R., and Hyun-Ick Y.** Hydraulic DTH Fluid, Mud Hammers with Recirculation Capabilities to Improve ROP and Hole Cleaning For Deep, Hard Rock Geothermal Drilling, Proceedings World Geothermal Congress, Melbourne, Australia, 19-25 April, 2015.
5. **Tishchenko I. V., Chervov V. V., and Smolyanitsky B. N.** Evaluation of Layout of Air Drill Hammer with Smooth Adjustment of Impact Impulse Frequency, Journal of Mining Science, 2017, vol. 53, no. 1, pp. 109–116.
6. **Smolianitsky B. N., Chervov V. V., Trubitsyn V. V., and Tishchenko I. V.** New pneumatic impact machines “Typhoon” for special construction works, Mechanization of construction, no. 7, pp. 5–8 [in Russian] [**Смоляницкий Б. Н., Червов В. В., Трубицын В. В., Тищенко И. В., Вебер И. Э.** Новые пневмоударные машины “Тайфун” для специальных строительных работ // Механизация строительства. — 1997. — № 7. — С. 5–8.]
7. **Kreinin G. V., Munzer E. G., Pavlov B. I., and Petreev A. M.** Machine building of mathematical models of devices with impact pneumatic drive, All-Union Symposium on pneumatic drives and control systems, Tula, 1981 (in Russian) [**Крейнин Г. В., Мюнцер Е. Г., Павлов Б. И., Петреев А. М.** Машинное построение математических моделей устройств с пневмоприводом ударного действия: Всесоюзный симпозиум по пневматическим приводам и системам управления. — Тула, 1981.]
8. **SimulationX** [computer software]. Dresden, Germany: ESI ITI GmbH. Available from <https://www.simulationx.com/simulation-software.html>. ESA ITI SimulationX [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.simulationx.com>, (12.03.2018).