

ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК И ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ УСТАНОВКИ СВАЙ В ГРУНТЫ

*В.В. Родченко¹, А.Г. Галеев², В.А. Заговорчев¹,
Э.Р. Садретдинова¹, М.Я. Кыласов¹*

¹Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)
125993 Москва, ГСП-3, А-80, Волоколамское ш., д. 4
Тел.: (8-499) 158-91-36

²Научно-испытательный центр ракетно-космической промышленности
141320 Пересвет, Московская область, ул. Бабушкина, д. 9
Тел.: (8-496) 546-34-75

Заключение совета рецензентов: 01.11.15 Заключение совета экспертов: 05.11.15 Принято к публикации: 09.11.15

В статье рассмотрены вопросы использования твердотопливных и пароводянных реактивных двигателей для установки свай в грунты при возведении фундаментов различных сооружений. Использование подобных двигателей позволяет принципиально изменить технологию проведения работ, что в условиях труднодоступной местности может привести к экономии времени и средств. Существенным недостатком всех современных средств установки свай является их большая масса, составляющая десятки и сотни тонн. Предлагаемый способ способен ускорить процесс и имеет существенно меньшую массу оборудования. Авторами определены удельный импульс двигателя и потребный запас топлива в зависимости от поперечного сечения сваи. Предоставлена принципиальная конструкционная схема установки и даны рекомендации по возможности ее использования в городах и удаленной местности.

Ключевые слова: свая, фундамент, твердотопливный ракетный двигатель, пароводяной ракетный двигатель, тяга двигателя.

PARAMETERS ESTIMATION AND POSSIBILITY OF USING ROCKET ENGINES FOR PILE PLACING IN THE SOILS

V.V. Rodchenko¹, A.G. Galeev², V.A. Zagovorchev¹, E.R. Sadretdinova¹, M.Ya. Kylasov¹

¹Moscow Aviation Institute (National Research University)
4 Volokolamskoe sh., GSP-3, A-80, Moscow, 125993, Russia
Tel.: (8-499) 195-91-36

²Research and Test Center of Rocket and Space Industry
9 Babushkin str., Peresvet, Moscow reg., 141320, Russia
Tel.: (8-496) 546-34-75

Referred: 01.11.15 Expertise: 05.11.15 Accepted: 09.11.15

The article discusses the solid-fuel and water-steam rocket engine use for pile installation into the soils during the basement construction of different buildings. Use of such engine allows fundamentally change the technology of pile installation, that result in time and resources saving especially in hard-to-reach places. Important disadvantage of all modern pile-driving equipment is their large mass of tens and hundreds tons. The proposed method is able to speed up the process and has significantly less weight equipment. The authors defined a specific impulse of the engine and required fuel supply depending on the cross-section of the pile. Fundamental constructive sketch of the unit and recommendation of the possibility of its use in cities and remote areas are presented.

Keywords: pile, basement, solid-fuel rocket engine, water-steam rocket engine, jet thrust.





Владимир
Викторович
Родченко
Vladimir V.
Rodchenko

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор, почетный работник высшей школы, действительный член Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, профессор кафедры «Управление эксплуатацией ракетно-космических систем» МАИ; научно-педагогический стаж более 40 лет.

Был руководителем и участвовал в выполнении ряда работ по заказам промышленности, в том числе по программам «Энергия-Буран», «Магистраль», «Синева» и др.

Образование: Московский авиационный институт (1970).

Область научных интересов: теория и практика создания реактивных устройств, способных двигаться в грунтах с высокими скоростями; отработка сложных технических систем.

Публикации: более 180, в том числе 8 монографий, 9 учебных пособий, 4 авторских свидетельства и патента на изобретения.

Information about the author: Doctor of Science, Professor, Honorary Worker of Higher School, member of the K.E. Tsiolkovsky Russian Academy of Cosmonautics, the Deputy Head of the department "Management of operation of rocket and space systems" of Moscow Aviation Institute (National Research University); scientific and pedagogical experience more than 40 years. He was a leader and participated in the implementation of a number of contractual works on the orders of the industry, including the following programs: "Energia-Buran", "Highway", "The blue", etc.

Education: Moscow Aviation Institute (1970).

Research area: Theory and practice of jet devices that can move in the ground at high speeds; testing of complex technical systems.

Publications: more than 180, including 8 monographs, 9 textbooks, 4 patents for inventions.

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор, лауреат премии Совета Министров СССР в области науки и техники, действительный член Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, главный научный сотрудник ФКП «НИЦ РКП», профессор МАИ; научно-педагогический стаж более 40 лет.

Участвовал в отработке ряда систем по ракетно-космическим программам «Космос-1», «Космос-3», «Н1Л3», «Энергия-Буран», «GSLV», «Ангара» и др.

Образование: Казанский авиационный институт (1961).

Область научных интересов: теория и практика наземных испытаний ракетных двигателей и двигательных установок, гидро- и газодинамика процессов в энергоустановках, исследования в области водородной технологии.

Публикации: более 190, в том числе 7 монографий, 6 учебных пособий, 44 авторских свидетельства и патента на изобретения.

Information about the author: Doctor of Science (Engineering Science), Professor, Laureate of USSR Council of Ministers in the field of science and technology, member of the K.E. Tsiolkovsky Russian Academy of Cosmonautics, Chief Researcher of the PCF "SIC RSI", professor of "Management of operation of rocket and space systems" of Moscow Aviation Institute (National Research University); scientific and pedagogical experience of 40 years.

Participated in working out a number of systems for missile and space programs "Space-1", "Space-3", "N1L3", "Energia-Buran", "GSLV", "Angara" and others.

Education: Kazan Aviation Institute (1961).

Research area: theory and practice ground tests of rocket engines and moving-enforcement units, hydro and gas dynamics processes in power plants, research in the field of water-native technology.

Publications: more than 190, including 7 monographs, 6 textbooks, 44 patents for inventions.

Сведения об авторе: старший преподаватель кафедры «Управление эксплуатацией ракетно-космических систем» МАИ, научно-педагогический стаж 4 года.

Образование: МАИ (2011).

Область научных интересов: теория создания и испытания реактивных устройств, способных двигаться в грунтах с высокими скоростями, системы автоматизированного проектирования.

Публикации: 11.

Information about the author: Senior lecturer of "Management of exploitation in rocket and space systems" department in MAI; scientific and pedagogical experience 4 years.

Education: MAI (2011).

Research area: theory of jet devices designing and testing that can move in the soil with the high speed; computer-aided designing.

Publications: 11.



Владимир
Александрович
Заговорчев
Vladimir A.
Zagovorchev





Эльнора Рамилевна
Садретдинова
Elnara R. Sadretdinova

Сведения об авторе: старший преподаватель кафедры «Управление эксплуатацией ракетно-космических систем» МАИ, научно-педагогический стаж 7 лет.

Образование: МАИ (2008).

Область научных интересов: теория создания реактивных устройств, способных двигаться в грунтах; управление эксплуатацией ракетно-космической техники.

Публикации: 34.

Information about the author: Senior lecturer of "Management of exploitation in rocket and space systems" department in MAI; scientific and pedagogical experience 7 years.

Education: MAI (2008).

Research area: theory of jet devices designing that can move in the ground; management of exploitation in rocket and space systems.

Publications: 34.



Михаил Ярославович
Кыласов
Mikhail Ya. Kylasov

Сведения об авторе: студент кафедры «Управление эксплуатацией ракетно-космических систем» МАИ.

Образование: неоконченное высшее, МАИ.

Область научных интересов: эксплуатация ракетно-космических систем, теория движения в грунте.

Публикации: 3.

Information about the author: Student of "Management of exploitation in rocket and space systems" department in MAI.

Education: MAI.

Research area: exploitation of rocket and space systems; theory of movement in the soil.

Publications: 3.

Сваи используют как элемент при возведении фундаментов, для упрочнения и повышения устойчивости оснований и массивов грунта. Свайные фундаменты применяют при строительстве зданий и сооружений различной степени сложности от простых бытовых и вспомогательных помещений до крупных объектов уровня космодрома. К свайным фундаментам прибегают в тех случаях, когда в основании залегают слабые или неустойчивые грунты, а также при строительстве в зимнее время, когда промерзание грунта не дает возможности применять другие виды фундамента.

В частности, при возведении монтажно-испытательного комплекса космодрома «Восточный» (Амурская область) было установлено около 360 свай, которые забивались на глубину до 8 метров. Высокие темпы стройки данного проекта подразумевают круглогодичную работу, в том числе и зимой, когда из-за низких температур воздуха и маломощного снежного покрова почвы промерзают на глубину до 3 метров и окончательно оттаивают только в июле.

В производстве сваи классифицируются по различным принципам, в частности, по способу устройства они разделяются на готовые, изготавливаемые на заводе и погружаемые в грунт различными способами, а также на набивные, устраиваемые непосредственно в грунте.

Забивные железобетонные, деревянные и стальные сваи погружают в грунт без его выемки с помо-

щью молотов, вибронагрузителей, вибровдавляющих и вдавливающих устройств.

В качестве забивных свай на практике чаще всего применяются железобетонные призматические сваи сплошного квадратного сечения размером от 0,2×0,2 м до 0,4×0,4 м и длиной от 3 до 20 м.

Производительность современных машин со сваебойным оборудованием, имеющим гидравлическую систему наведения на точку погружения, достигает достаточно высоких значений (до 60 свай в смену). Однако с целью исключения воздействия шума, ударных волн и вибраций на окружающие здания, что особенно важно в условиях плотной городской застройки, наличие неподалеку исторических памятников и ветхих домов, целесообразно применять сваевдавливающие машины.

Такие установки представляют собой гидравлическую сваевдавливающую машину, которая установлена на устройстве ее перемещения. Сваевдавливающая машина содержит в своей конструкции раму, направляющие колонны с размещенными на них вдавливающим и зажимным механизмами, гидроцилиндры рабочего и обратного хода, а также средства управления. Скорость погружения свай с помощью таких машин достигает высоких показателей и составляет порядка одного метра в минуту.

Существенным недостатком всех современных средств установки свай как методом забивки, так и вдавливания является их большая масса, составляющая десятки и сотни тонн.



Настоящая статья посвящена расчету параметров устройств, способных производить установку свай с высокой скоростью и имеющих существенно меньшую массу оборудования.

С этой целью предполагается в качестве вдавливающего механизма использовать либо ракетный двигатель твердого топлива (РДТТ), либо пароводяной ракетный двигатель (ПВРД).

Использование подобных двигателей позволяет принципиально изменить технологию проведения работ по установке свай, что в условиях труднодоступной местности может привести к экономии времени и средств.

Одним из существенных факторов, влияющих на выбор в качестве вдавливающего устройства ракетного двигателя твердого топлива, является то обстоятельство, что в настоящее время в стране накоплен большой энергетический потенциал в виде зарядов твердого топлива, подлежащего утилизации по истечении гарантийного срока хранения.

На рис. 1 представлена схема машины, использующей реактивный двигатель для вдавливания свай в грунт.

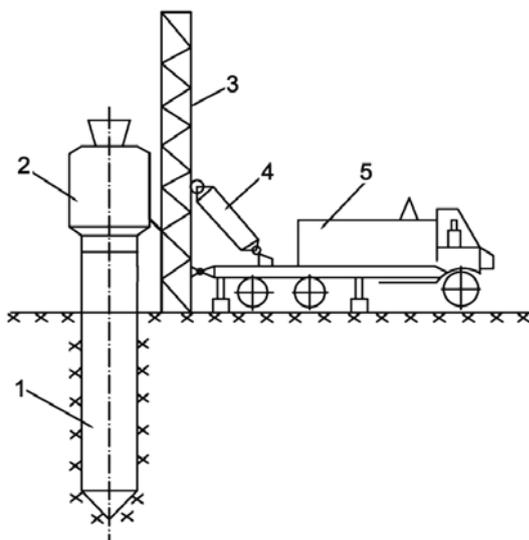


Рис. 1. Общая схема сваевдавливающей машины:

- 1 – свая с оголовком; 2 – реактивный двигатель;
- 3 – направляющее устройство; 4 – гидродомкрат;
- 5 – транспортный аппарат с проверочно-пусковым оборудованием

Fig. 1. General scheme of pile-driving unit: 1 – pile with headroom; 2 – jet engine; 3 – guiding device; 4 – hydraulic jack; 5 – transport unit with check-starting equipment

Для определения основных технических характеристик двигательной установки запишем уравнение движения системы «свая-двигатель» (вертикальное движение):

$$M_{сд} \frac{dV}{dt} = M_{сд}g + R - F, \quad (1)$$

где $M_{сд} = M_c + M_d$ – суммарная масса, включающая в себя массу свай (M_c) и двигателя (M_d); g – ускорение

силы тяжести; R – тяга двигателя; F – сила сопротивления грунта при движении системы «свая-двигатель» со скоростью V .

С целью организации оптимального процесса вдавливания свай тяга двигателя должна в два раза превышать уровень статического сопротивления грунта свае F_0 [1]. При этом скорость движения системы «свая-двигатель» будет определяться по формуле

$$V_{opt} = \sqrt{\frac{2F_{0уд}}{C_X \rho_{гр}}}, \quad (2)$$

где $F_{0уд}$ – удельное статическое сопротивление грунта свае; C_X – коэффициент сопротивления грунта; $\rho_{гр}$ – плотность грунта.

На основании многочисленных экспериментальных данных (выборка составляет 340 случаев по статическому зондированию грунтов в Московской области на глубину до 100 м) построена гистограмма и кривая выравнивающих частот распределения удельного лобового сопротивления (рис. 2), которая позволила найти математическое ожидание $m_{F_{0уд}} = 6,91$ МПа удельного лобового сопротивления грунта в Московской области [2]. Дисперсия случайной величины $D = 2,43$.

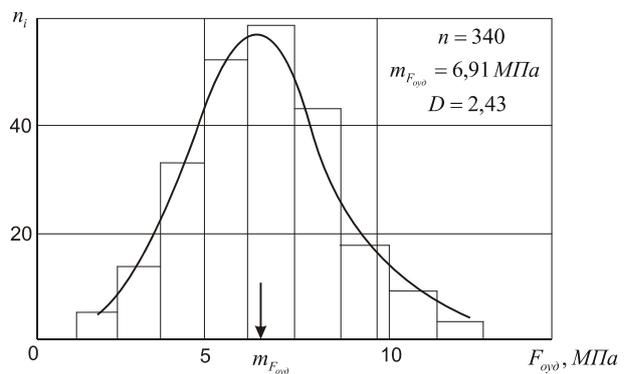


Рис. 2. Гистограмма и кривая выравнивающих частот распределения удельного лобового сопротивления

Fig. 2. Bar chart and leveling frequency curve of specific frontal resistance partitioning

Плотность некоторых грунтов приведена в таблице.

Плотность грунтов
Soil density

Виды грунтов	Плотность $\rho_{гр}$, кг/м ³
Насыпь	1300-1500
Песок	1450-1700
Суглинок	1350-1650
Супесь	1350-1700
Глина	1750-2300

Коэффициент сопротивления грунта зависит от параметра θ , который определяется по формуле

$$\theta = V \sqrt{\rho_{\text{ГР}} / \tau_s}, \quad (3)$$

где $\tau = (0,2-0,8)$ МПа – прочность грунта на сдвиг.

При малых значениях скорости проникновения коэффициент сопротивления грунта сильно зависит от скорости движения и значительно превышает $C_X = 1$, а при больших скоростях проникновения практически не зависит от скорости и приближается к постоянному значению $C_X = 0,85$. Ряд исследователей отмечает, что и при скоростях проникания тела, меньших скорости звука в грунте, величина коэффициента сопротивления C_X может считаться постоянной величиной при изменении скорости проникновения V в небольших по сравнению со скоростью звука интервалах.

Из (2) следует, что для грунта, характеризуемого удельным статическим сопротивлением $F_{0\text{уд}} = 6,91$ МПа, плотностью $\rho_{\text{ГР}} = 1800$ кг/м³, значением коэффициента сопротивления грунта $C_X = 0,85$, система «свая-двигатель» будет двигаться в грунте со скоростью $V = 95,04$ м/с. При этом тяга двигателя должна быть равна удвоенному значению статического сопротивления сваи.

Для случая движения системы «свая-двигатель» в грунте со скоростью порядка сотни метров в секунду полную силу сопротивления F можно определить по формуле [3]

$$F = \left(F_{0\text{уд}} + C_X \frac{\rho_{\text{ГР}}}{2} V^2 \right) S_M, \quad (4)$$

где S_M – площадь поперечного сечения сваи.

Анализ зависимостей (2) и (4) показывает, что полное сопротивление движению сваи состоит из статического и динамического сопротивлений, которые при скорости погружения $V_{\text{опт}}$ равны между собой; при этом тяга двигателя должна быть равна этому полному сопротивлению грунта.

В первом приближении, предполагая, что свая будет двигаться с постоянной скоростью, равной $V_{\text{опт}}$, для вдавливания сваи длиной L необходимо, чтобы двигатель работал время T , равное

$$T = L / V_{\text{опт}}. \quad (5)$$

В свою очередь, из теории ракетных двигателей известно, что масса потребного топлива M_T , необходимого для работы двигателя тягой R в течение времени T , определяется зависимостью

$$M_T = RT / I_{\text{ед}}, \quad (6)$$

где $I_{\text{ед}}$ – единичный импульс топлива или удельная тяга двигателя, являющиеся характеристиками двигателей, использующих различные топлива.

Подставляя в (6) время T , определяемое по (5), получим выражение, определяющее глубину погру-

жения сваи L с потребным запасом топлива ракетного двигателя M_T :

$$M_T = \frac{RL}{I_{\text{ед}} V_{\text{опт}}}. \quad (7)$$

Учитывая, что $R = 2F_0 = 2F_{0\text{уд}} S_M$ и подставляя в (7) $V_{\text{опт}}$ из (2), будем иметь

$$M_T = \frac{L S_M \sqrt{2 F_{0\text{уд}} C_X \rho_{\text{ГР}}}}{I_{\text{ед}}}. \quad (8)$$

На рис. 3 представлены зависимости массы топлива ракетного двигателя твердого топлива в зависимости от размера поперечного сечения a квадратной сваи высотой $L = 10$ м, устанавливаемой в грунт, имеющий значение удельного сопротивления $C_X = 0,85$, удельного статического сопротивления $F_{0\text{уд}} = 6,91$ МПа и плотность 1800 кг/м³, для различных значений единичного импульса топлива.

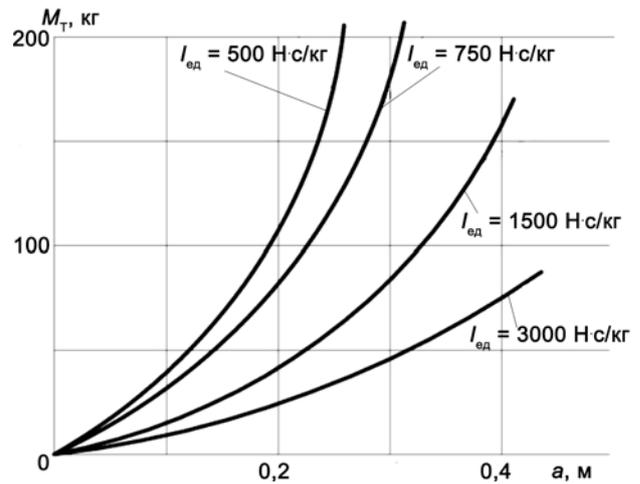


Рис. 3. Зависимость массы топлива РДТТ от размера поперечного сечения сваи
Fig. 3. Solid-fuel mass dependence on pile cross-section dimension

Из графика видно, что для вдавливания сваи с квадратным сечением размером 20×20 см и длиной 10 м в грунты, характерные для Московской области, необходимо иметь запас твердого топлива с удельным импульсом $I_{\text{ед}} = 2500$ Н·с/кг порядка $M_T = 25,23$ кг.

Проведенные в последние годы исследования [4] позволяют предложить концепцию нового экологически чистого пароводяного двигателя, использующего в качестве рабочего тела предварительно нагретую от постороннего источника воду.

Перегретая вода, находящаяся в жидком состоянии под давлением и при температуре, близкой к состоянию насыщения, закачивается в замкнутую полость камеры двигателя. При разгерметизации камеры двигателя вода испаряется и образующийся пар выбрасывается через сопловое устройство, создавая реактивную тягу.



Для обеспечения высокой плотности заполнения рабочим телом камеры двигателя температура и давление перегретой воды не должны превышать состояния насыщения. Поэтому предельные параметры нагрева воды не могут превышать критической температуры, равной 647,3 К, и соответствующего критического давления, равного 22,6 МПа; при этом скорость истечения (единичный импульс) может достигать уровня $W_a = 750-1000$ м/с.

Следует иметь в виду то обстоятельство, что чем выше температура нагрева воды, тем выше запасаемая тепловая энергия и, следовательно, больше удельная тяга двигателя, но при этом растет уровень пускового давления. Поэтому приемлемый уровень пускового давления и температуры лежит обычно в диапазоне 8-15 МПа и 200-350 °С.

Пароводяные ракетные двигатели имеют более низкую тягу в сравнении с твердотопливными ракетными двигателями. Однако простота их конструкции и относительная дешевизна делают их конкурентоспособными с другими типами двигателей.

В связи с тем, что основным рабочим телом пароводяных ракетных двигателей служит вода, они являются одними из самых экологически чистых видов двигателей. Тем не менее, необходимо также оценивать экологическую безопасность источников получения энергии, идущей на нагрев воды. Наименьший экологический вред следует ожидать при использовании электрической энергии, получаемой на гидроэлектростанциях, солнечной и тепловой энергии Земли.

Из графика на рис. 3 видно, что при вдавливании сваи с помощью пароводяного двигателя, имеющего удельную тягу $I_{ед} = 1000$ Н·с/кг, понадобится в три

раза больше воды, чем твердого топлива в случае вдавливания такой же сваи в аналогичный грунт с помощью ракетного двигателя твердого топлива, имеющего единичный импульс $I_{ед} = 3000$ Н·с/кг.

Следует отметить, что величина нагрузки, которую может воспринимать свая, принимая во внимание допустимые деформации грунта (несущую способность), обычно определяется в зависимости от особенностей грунта, в который она погружается.

Для расчетов обычно используется формула [5]

$$F_{уд} = F_{0уд}S_M + \Pi L f_{бок}, \quad (9)$$

где F_0 – удельное статическое лобовое сопротивление грунта под подошвой сваи; S_M – площадь миделевого сечения; Π – периметр сечения сваи; L – длина сваи; $f_{бок}$ – удельное значение сопротивления боковой поверхности сваи (для глинистых грунтов $f_{бок} = 60-120$ кПа).

Расчеты несущей способности сваи, установленной в глинистый грунт, показывают, что ее величина в 3-3,5 раза может превышать уровень лобового статического сопротивления и в 1,5-1,75 раза быть больше оптимального уровня тяги ракетного двигателя, используемого для ее погружения.

Таким образом, в целом ряде случаев, связанных с необходимостью быстрого устройства опор, особенно в удаленных и труднодоступных местах, целесообразно в качестве силового агрегата для вдавливания сваи использовать ракетные двигатели твердого топлива. В населенных пунктах и местах с повышенными требованиями к безопасности возможно применять в этом качестве экологически чистые пароводяные ракетные двигатели.

Список литературы

1. Родченко В.В., Гусев Е.В., Галеев А.Г., Садретдинова Э.Р. Выбор параметров пенетратора, входящего в лунный грунт с нулевой скоростью // Электронный журнал «Труды МАИ». 2013. № 64.
2. Родченко В.В. Основы проектирования реактивных аппаратов для движения в грунте. М.: МАИ-ПРИНТ, 2007.
3. Галеев А.Г., Захаров Ю.В., Родченко В.В., Заговорчев В.А., Садретдинова Э.Р. Экспериментальная проверка метода выбора проектных параметров реактивных пенетраторов для движения в лунном грунте // Альтернативная энергетика и экология – ISJAE. 2014. № 16 (156). С. 44-50.
4. Мосесов С.К. Пароводяные ракетные двигатели. М., 1996.
5. Гинсбург Л.Я. Исследование несущей способности свай. Дис. ... канд. техн. наук, 1972.

References

1. Rodčenko V.V., Gusev E.V., Galeev A.G., Sadretdinova È.R. Vybora parametrov penetratora, vhodâšego v lunnyj grunt s nulevoj skorost'û // Èlektronnyj žurnal «Trudy MAI». 2013. № 64.
2. Rodčenko V.V. Osnovy proektirovaniâ reaktivnyh apparatov dlâ dviženiâ v grunte. M.: MAI-PRINT, 2007.
3. Galeev A.G., Zaharov Û.V., Rodčenko V.V., Zagovorčev V.A., Sadretdinova È.R. Èksperimental'naâ proverka metoda vybora proektnyh parametrov reaktivnyh penetratorov dlâ dviženiâ v lunnom grunte // Al'ternativnaâ ènergetika i èkologiâ – ISJAE. 2014. № 16 (156). С. 44-50.
4. Mosesov S.K. Parovodânye raketnye dvigateli. M., 1996.
5. Ginsburg L.Â. Issledovanie nesušej sposobnosti svaj. Dis. ... kand. tehn. nauk, 1972.

Транслитерация по ISO 9:1995

