

УДК 624.088.8

**Мудров Александр Григорьевич**

доктор технических наук, профессор

E-mail: [Alexmudrov42@rambler.ru](mailto:Alexmudrov42@rambler.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

**Мудрова Анна Александровна**

соискатель

E-mail: [annamudrova@mail.ru](mailto:annamudrova@mail.ru)

**Федеральная служба по аккредитации (Росаккредитация)**

Адрес организации: 117312, Россия, г. Москва, ул. Вавилова, д. 7

## Использование регулируемого силового воздействия в строительных технологиях

### Аннотация

*Постановка задачи.* В нашей стране с каждым годом увеличивается объем жилищного и промышленного строительства, при которых широко используются устройства с силовыми воздействиями: для забивания свай, уплотнения грунта и асфальтобетонных покрытий, извлечения труб и свай и т.п. Используемые устройства для этих целей не всегда удовлетворяют производителей из-за дороговизны иностранных изделий, а техника российского производства ограничена в количестве и несовершенна.

Цель исследования – разработать универсальные малогабаритные эффективные устройства для силового воздействия в различных строительных технологиях.

*Результаты.* В результате исследования предложены новые малогабаритные устройства, использующие направленное регулируемое силовое воздействие как при забивании или извлечении свай, уплотнении грунта или асфальтобетонного покрытия, так и для самопередвижения устройства (в качестве движителя).

*Выводы.* Значимость полученных результатов для строительной отрасли заключается в создании новых малогабаритных универсальных эффективных устройств как для уплотнения грунта и асфальтобетона, так и для забивания и извлечения свай и труб и самопередвижения, в качестве движителя.

**Ключевые слова:** силовое воздействие, уплотняющее устройство, забивание свай, инерционные силовые импульсы.

### Введение

Машины и устройства для уплотнения грунтов предназначены для увеличения плотности и прочности грунтов, придания им необходимой устойчивости, несущей способности и водонепроницаемости [1]. Грунты уплотняются укаткой, трамбованием, вибрацией, виброукаткой и вибротрамбованием.

Наиболее распространенным оборудованием для уплотнения являются катки, прицепные и самоходные, которые уплотняют слой толщиной до 20 см, необходимая степень уплотнения достигается за 6-12 проходов по одному следу, при этом затрачивается значительная мощность от 57 до 121 кВт, что снижает эффективность процесса.

Качество уплотнения грунта и асфальтобетонных покрытий зависит от многих факторов, в том числе, от типа катков, режима их работы, температуры асфальтобетонной смеси, толщины уплотняемого слоя и т.д. [2-4].

Для погружения свай используются копры, молоты, которые могут быть различного действия: механические, паровоздушные, гидравлические, дизель-молоты [5].

Ударное действие копров нежелательно вблизи жилых строений из-за шума и опасностью для фундаментов сооружений.

Следует отметить, что используемая техника в строительстве не всегда обеспечивает требуемое качество работ, например, при уплотнении катками необходимо производить много проходов по одному и тому же следу, затрачивать большие мощности.

Виброплиты не имеют направленного силового воздействия от вращающегося дебаланса, поскольку имеют круговое действие с одинаковым значением, что недостаточно эффективно для уплотнения. Кроме этого, они затрачивают сравнительно большие мощности на рабочий процесс, а перемещаются по уплотняемой площади с помощью тяги оператора, на здоровье которого оказывают вредное влияние вибрации.

Из публикаций зарубежных авторов можно выделить темы по уплотнению асфальтобетона [6, 7]. Кроме того, за рубежом пространственные механизмы только с вращательными шарнирами и устройства на их базе не используются, так как ученые не могут их изготовить.

Авторами поставлена цель – разработать универсальные малогабаритные эффективные устройства, использующие направленное регулируемое силовое воздействие, как при забивании или извлечении свай, уплотнении грунта или каменного материала и асфальтобетонного покрытия, так и для самопередвижения устройства без участия оператора.

### **Анализ и обсуждение исследования**

В устройствах строительных технологий использованы известные способы и механизмы, плоские и пространственные. В последних для соединения звеньев используются сочетания шаровых, шаровых с пальцем, цилиндрических и вращательных шарниров. В образовании пространственных механизмов с указанным набором шарниров затруднений нет, их можно создавать десятками, но шаровые шарниры сложнее изготавливать, у них малый ресурс, ограничения по несущей способности и другие недостатки.

Предпочтительнее во всех отношениях в механизмах иметь только вращательные шарниры, оформляемые стандартными подшипниками качения, у которых значительно выше силовые передаточные показатели и срок службы, они легко изолируются от агрессивной внешней среды, имеют высокий КПД. Но такие механизмы не подходят под известные теории и не должны проворачиваться. Был известен сферический механизм с вращательными шарнирами, теоретически описанный еще в 250 г. до новой эры в Египте и только 1800 лет спустя изготовленный и использованный для подвеса морских компасов, а еще через 150 лет – для передачи движения.

Поскольку преимущества вращательных шарниров в пространственных механизмах сомнений ни у кого не вызывали, ученые и практики многократно пытались образовать другие пространственные механизмы этого типа. Но обычной комбинацией звеньев никому не удалось создать хотя бы один работоспособный механизм.

Только в 1903 г. изобретательским путем английскому математику Беннетту удалось теоретически обосновать возможность существования пространственного четырехзвенного механизма, правда, с цилиндрическими шарнирами [8]. Беннетт пытался изготовить модель механизма, но сделать это ему не удалось, по этой причине он сомневался и в его практическом использовании, рассматривал механизм как математическое доказательство согласованного расположения тел в пространстве (теоретические изыскания математика).

В последующие годы многие ученые из США, Японии, Германии, СССР, Франции и других стран теоретически исследовали этот механизм, но ни модель, ни тем более производственный образец изготовить они не могли.

За прошедшие более сто лет никому из зарубежных и отечественных ученых не удалось изготовить не только натурный образец, но и модель механизма (это положение сохраняется и в настоящее время). Здесь наблюдался огромный разрыв между теорией и практикой.

Лишь казанскому ученому профессору Б.В. Шитикову [9] удалось изготовить модель механизма и, вместе с П.Г. Мудровым [10], началось исследование таких механизмов. На базе механизмов создано более сотни разнообразных устройств, защищенных более 120 авторскими свидетельствами и патентами на изобретения.

Создано новое научное направление в теории механизмов и машин, причем с хорошим практическим подтверждением. Данное научное направление является приоритетным в мире и в нашей стране.

Казанскими учеными раскрыты большие функциональные возможности пространственных механизмов только с вращательными шарнирами, используемые

эффективно в производственных целях по семи разделам техники. По данной тематике издано 7 монографий общим объемом 74,15 печатных листов, опубликовано более 70 научных статей в открытой печати различного уровня, внедрено в производство более 20 устройств различного назначения, получены 2 серебряные и 3 бронзовые медали ВДНХ СССР, бронзовая медаль НТО РСФСР.

На кафедре ДСМ КГАСУ продолжают исследования механизмов этой группы, за последние три года (начиная с 2016 г.) по семи разделам техники созданы устройства, защищенные 15 патентами, в том числе, 8 – на полезные модели и 7 – на патенты.

В данной статье рассматриваются устройства, основанные на базе четырехзвенного механизма Беннетта-Шитикова (предложено называть по фамилиям авторов теоретического и практического применения), для строительных технологий направленным силовым воздействием: уплотнение грунта и асфальтобетона, забивание свай и труб, инерционное транспортное средство.

Итак, в качестве базового модуля вышеупомянутых устройств принят механизм Беннетта-Шитикова, схема которого изображена на рис. 1.

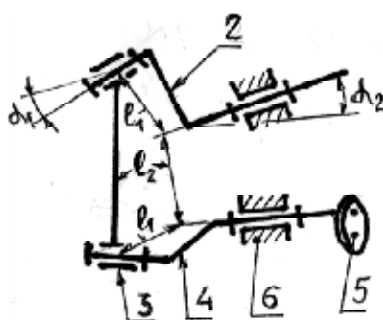


Рис. 1. Схема четырехзвенного механизма (иллюстрация авторов)

У механизма звено 2 – ведущий кривошип, звено 4 – ведомый кривошип, звено 3 – шатун, звено 6 – стойка, на валу ведомого кривошипа 4 закреплен дебалансный груз 5.

Особенность механизма заключается в том, что звенья соединены только на шарикоподшипниках качения, а шарниры противоположных звеньев (2, 4 и 3, 6) скручены (не параллельны и не пересекаются) под углами  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ , и расположены на расстояниях  $\ell_1$ ,  $\ell_2$ , при этом параметры связаны соотношением:

$$l_1/l_2 = \sin \alpha_1 / \sin \alpha_2. \quad (1)$$

Угол  $\alpha_1$  можно назначать от 10 до 50°, а угол  $\alpha_2$  – от 30 до 90°.

На рис. 2 отдельно показано фото опытного образца корпуса с подвижными звеньями 2-4 и дебалансным грузом 5, в устройстве угол  $\alpha_2$  принят равным 45°.

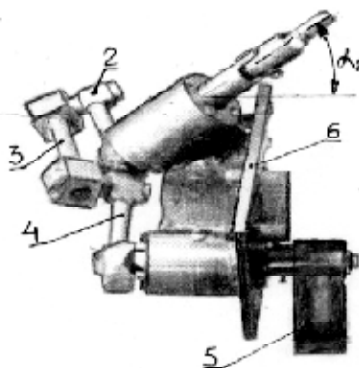


Рис. 2. Фото корпуса устройства (иллюстрация авторов)

Для использования механизма в качестве устройства для уплотнения грунта или асфальтобетона создана конструкция, схема которой показанная на рис. 3 [11].

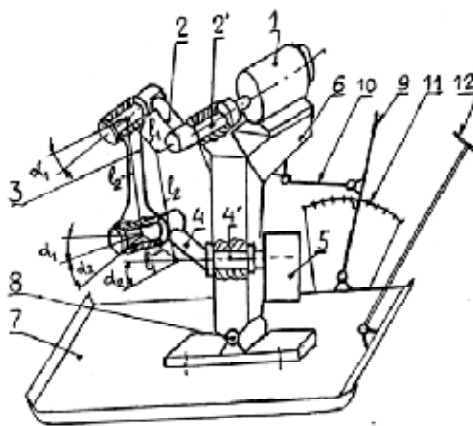


Рис. 3. Схема устройства для уплотнения грунта или асфальтобетона (иллюстрация авторов)

В этой конструкции угол  $\alpha_2$  принят  $90^\circ$ , угол  $\alpha_1$  может принимать значения от  $10$  до  $50^\circ$ . Стойка 6 (корпус) шарнирно установлена на плите 7 посредством шарнира 8 и с помощью тяги 10 и рычага 9 может поворачиваться вперед или назад.

Дебалансный груз 5 закреплен на валу 4' ведомого кривошипа 4. Привод устройства осуществляется от электродвигателя 1.

При работе устройства вращение от вала электродвигателя передается ведущему кривошипу 2 шатуну 3 и ведомому кривошипу 4 с дебалансным грузом 5. За счет скрещенного расположения осей шарниров звеньев 2 и 4, звена 3 и осей корпуса 6, ведомое звено 4 вместе с дебалансным грузом 5 будут иметь переменную на одном обороте угловую скорость, максимальное  $\omega_{max}$  и минимальное  $\omega_{min}$  значения, которых определяются выражениями:

$$\omega_{max} = \frac{\cos \alpha_1}{1 - \sin \alpha_1} \omega, \quad \omega_{min} = \frac{\cos \alpha_1}{1 + \sin \alpha_1} \omega, \tag{2}$$

где  $\omega$  – угловая скорость ведущего звена.

При переменной угловой скорости появляется ускорение  $a$ , вращающегося дебаланса 5, равное:

$$a = r\sqrt{\omega^4 + \varepsilon^2}, \tag{3}$$

где  $r$  – расстояние от оси вращения дебаланса до центра его массы;

$\omega$  – угловая скорость вращения дебаланса;

$\varepsilon$  – угловое ускорение вращения дебаланса.

В результате появляется сила инерции  $P$ , равная  $P = m \cdot a$  (здесь  $m$  – масса дебаланса), максимальное и минимальное значение которых равны:

$$P_{max} = mr \frac{\cos^2 \alpha_1}{(1 - \sin \alpha_1)^2} \omega^2, \quad P_{min} = mr \frac{\cos^2 \alpha_1}{(1 + \sin \alpha_1)^2} \omega^2. \tag{4}$$

Для движения устройства вперед рычагом 9 перемещают корпус 6 назад, в результате чего он повернется на угол  $\beta$  и силовое воздействие  $P$  будет направлено под тем же углом  $\beta$  (рис. 4а). Сила  $P$  разложится на составляющие силы: вниз  $P_{en} = P \cos \beta$  и вперед  $P_{en} = P \sin \beta$ .

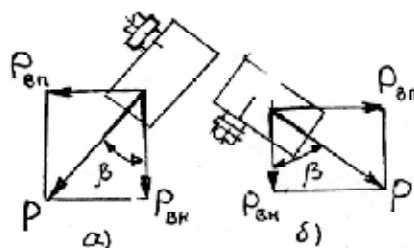


Рис. 4. Схема действия сил (иллюстрация авторов)

Сила  $P_{\text{вн}}$  уплотняет грунт, а сила  $P_{\text{вп}}$  перемещает устройство вперед. Ход перемещения зависит от угла  $\beta$  и соотношения сил  $P_{\text{вн}}$  и силы трения  $F_{\text{тр}}=mgf$  ( $f$  – коэффициент трения).

Регулировать режим силового воздействия устройства можно выбором углов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  и расстояний  $l_1$  и  $l_2$ , частотой вращения ведомого и ведущего звеньев, увеличением массы дебалансного груза, а также общим весом устройства.

Направленное силовое воздействие можно увеличить в разы, например, для погружения и извлечения свай, труб и т.п. Для этой цели объединяют два приводных механизма, как показано на рис. 5.

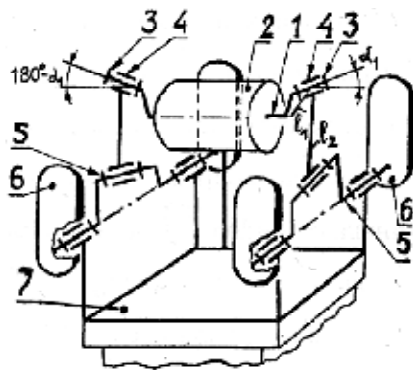


Рис. 5. Схема устройства для погружения свай (иллюстрация авторов)

Устройство включает электродвигатель 2 с двумя выходными валами 1 (общий приводной вал), на концах вала закреплены ведущие кривошипы 3, шарнирно-связанные с шатунами 4, последние шарнирно связаны с ведомыми кривошипами 5 особой конструкции с двумя концевыми валами, на которых закреплены дебалансные грузы 6. Все элементы конструкции размещены на плите 7 [12].

Действие этого устройства аналогично ранее рассмотренному устройству для уплотнения грунта или асфальтобетона, но в несколько раз интенсивнее и эффективнее.

Результирующее амплитудное значение направленной силы будет направлено в сторону, определяемую потребителем. При расположении устройства, показанного на рис. 5, воздействие можно направлять вниз, например, для погружения свай, и вверх – для вытаскивания их из грунта.

Одно из преимуществ устройства – возможность изменять направление действия результирующей силы. О ее направлении вверх или вниз было сказано ранее. С таким же успехом действие силы может, происходит под углом и в горизонтальном направлении (при соответствующем расположении устройства дебалансы вращаются в горизонтальной плоскости). В этом случае устройство будет выполнять одновременно роль двигателя с движителем. Пример использования устройства в этой роли показан на рис. 6.

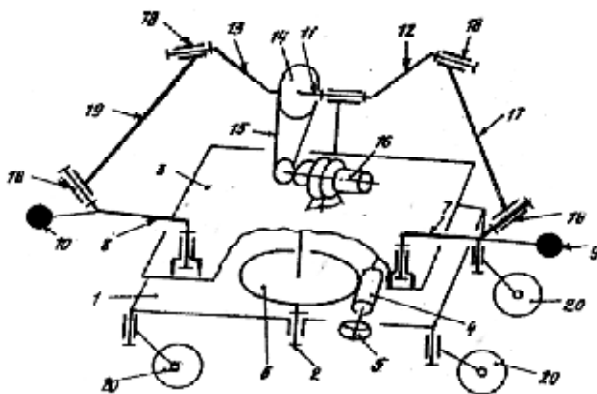


Рис. 6. Схема движителя (иллюстрация авторов)

Общее в данной конструкции с предыдущей конструкцией для погружения или извлечения свай (рис. 5) состоит в том, что, как в той, так и этой конструкции два механизма объединены через общий вал, на котором жестко закреплены ведущий и ведомый кривошипы; принцип создания регулируемых силовых воздействий одинаковый; с кривошипами шарнирно связаны шатуны, а шатуны также шарнирно связаны с ведомыми кривошипами, на валах которых закреплены дебалансные грузы.

Однако имеются и существенные отличия.

Во-первых, в конструкции для погружения свай, ведомые кривошипы с дебалансными грузами вращаются в вертикальной плоскости, а в конструкции движителя (рис. 6) грузы вращаются в горизонтальной плоскости.

Во-вторых, у ведомых кривошипов погружателя по два концевых вала, на которых закреплены дебалансные грузы, их в конструкции четыре. А в предложенной конструкции движителя всего два дебалансных груза [13].

В-третьих, в погружателе плита, на которой размещены элементы механизмов, непосредственно крепится к торцу погружаемой сваи или трубы.

В предложенной конструкции движителя элементы механизмов размещены на поворотной раме, которая связана рулевым управлением в виде червячного зубчатого зацепления с рулевым колесом с ходовой плитой, снабженной самоустанавливающимися колесами (рис. 6) или плитой в виде лыжных полос.

При встречном вращении дебалансных грузов с переменной угловой скоростью максимальное и минимальное значения силового воздействия будут определяться выражениями:

$$P_{\max} = 2mr \frac{\cos^2 \alpha}{(1 - \sin \alpha)^2} \omega^2, \quad P_{\min} = 2mr \frac{\cos^2 \alpha}{(1 + \sin \alpha)^2} \omega^2, \quad (5)$$

где  $m$  – масса дебалансных грузов;

$r$  – радиус вращения груза;

$\alpha$  – угол скручивания осей шарниров кривошипов;

$\omega$  – угловая скорость ведущих кривошипов.

Анализ выражений (5) показывает, что величина силового воздействия зависит от значений масс дебалансов, радиуса вращения, угловой скорости, а также от углов скручивания кривошипов. При этом максимальное значение силы в несколько раз превышает минимальное значение и силу трения колес или ползунков о грунт, что является гарантией передвижения по любому бездорожью.

### Заключение

1. Известные малогабаритные устройства российского производства для строительной отрасли недостаточно эффективны, известны в ограниченном числе. Возникла практическая потребность в создании новой высокоэффективной техники, в том числе, для уплотнения, погружения и извлечения свай из грунта, самопередвижения от одного электродвигателя.

2. Создан универсальный блок на базе механизма Беннетта-Шитикова, который используется как самостоятельное устройство для уплотнения грунта и асфальтобетонных покрытий и для создания другой универсальной техники в строительных технологиях.

3. Разработаны малогабаритные эффективные устройства, использующие направленный силовой инерционный импульс при уплотнении грунта и асфальтобетона и самопередвижение при работе, погружении свай и труб, извлечения их из грунта, используются в качестве универсального движителя.

### Список библиографических ссылок

1. Шестопалов К. К. Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины и оборудование. М. : Академия, 2009. 320 с.

2. Баловнев В. И. Дорожно-строительные машины и комплексы. М.-Омск : СибАДИ, 2001. 528 с.
3. Головин А. А. Виброволновые дорожные катки: Конструкция. Теория и расчет. Опыт применения. Тверь : ТГТУ, 2002. 76 с.
4. Мирсяпов Илизар Т., Королева И. В., Сабирзянов Д. Д. Прочность и деформации глинистых грунтов при трехосном режимном чередующемся статическом и циклическом нагружении // Геотехника Беларуси: Наука и практика. 2013. С. 297–304.
5. Гетц А. В., Сафаров Н. А., Игнатъев Г. В. Механизация процесса уплотнения асфальтобетонной смеси катком // Молодой ученый. 2017. № 2. С. 89–91.
6. Ugay S. M. Pavement roller with perforated operating elements // World applied sciences journal. 2013. Vol. 25. № 5. P. 704–709.
7. Ryan S. Intelligent compaction overview // Proceedings of Idaho asphalt conference, 2014. 17 p.
8. Bennett G. T. A new mechanism. Engineering. Vol. 76. 1903. P. 777–778.
9. Шитиков Б. В. Исследование пространственных шарнирных механизмов. Казань : КХТИ, 1957. 28 с.
10. Мудров П. Г. Пространственные механизмы с вращательными парами. Казань : Казанский университет. 1976. 264 с.
11. Устройство для уплотнения грунта : пат. 2583802 Рос. Федерация, № 2015100377/03 ; заявл. 12.01.15 ; опубл. 10.05.16, Бюл. № 13. 5 с.
12. Устройство для погружения свай : авт. свид. № 1245656. СССР. № 3790987/29-33 ; заявл. 11.09.84 ; опубл. 23.07.86. Бюл. № 27, 1986. 5 с.
13. Инерционный двигатель : авт. свид. № 939817 СССР. № 2872903/25-06; заявлено 22.01.80 ; опубл. 30.06.82. Бюл. № 24. 5 с.

**Mudrov Alexandr Grigorievich**

doctor of technical sciences, professor

E-mail: [Alexmudrov42@rambler.ru](mailto:Alexmudrov42@rambler.ru)

**Kazan state University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

**Mudrova Anna Aleksandrovna**

researcher

E-mail: [annamudrova@mail.ru](mailto:annamudrova@mail.ru)

**The Federal service for accreditation (Rosakkreditatsiya)**

The organization address: 117312, Russia, Moscow, Vavilova st., 7

## The use of controlled force in construction technologies

### Abstract

*Problem statement.* In our country, every year the volume of housing and industrial construction increases, in which devices with force effect are widely used: for driving piles, compaction of soil and asphalt concrete coatings, extraction of pipes and piles, etc. the devices Used for these purposes do not always satisfy production workers because of the high cost of foreign products, and the equipment of Russian production is limited in quantity and imperfect.

The aim of the research is to develop universal small-sized effective devices for force action in various construction technologies.

*Results.* As a result of the study, new small-sized devices are proposed that use directional controlled force action both when driving or removing piles, compacting soil or asphalt concrete pavement, and for self-movement of the device (as a mover).

*Conclusions.* The significance of the results obtained for the construction industry is the creation of new small-sized universal effective devices for compacting soil and asphalt concrete, and for driving and removing piles and pipes and self-propulsion, as a mover.

**Keywords:** force action, sealing device, pile driving, inertial force impulses.

### References

1. Shestopalov K. K. Lifting and transport, construction and road machinery and equipment. M. : Academia, 2009. 320 p.
2. Balovnev V. I. Road-building machines and complexes. M.-Omsk : SibADI, 2001. 528 p.
3. Golovnin A. A. Webrevolve road rollers : Design. Theory and calculation. Application experience. Tver : TSTU, 2002. 76 p.
4. Mirsayapov Ilizar T., Koroleva I. V., Sabirzyanov D. Strength and deformation clay soils under triaxial regime alternating static and cyclic loading // Geotekhnika Belarusi: Nauka i praktika. 2013. P. 297–304.
5. Getz A. V., Safarov N. A., Ignatiev G. V. Mechanization of the compaction process of asphalt concrete mixture with a roller // Molodoy uchenyy. 2017. № 2. P. 89–91.
6. Ugay S. M. Pavement roller with perforated operating elements // World applied sciences journal. 2013. Vol. 25. № 5. P. 704–709.
7. Ryan S. Intelligent compaction overview // Proceedings of the Idaho asphalt conference, 2014. 17 p.
8. Bennett G. T. A new mechanism. Engineering. Vol. 76. 1903. P. 777–778.
9. Shitikov B. V. Investigation of spatial hinge mechanisms. Kazan : KSTU, 1957. 28 p.
10. Mudrov P. G. Spatial mechanisms with rotational pairs. Kazan : Kazan University, 1976. 264 p.
11. Soil compaction device : patent 2583802 Rus. Federation, № 2015100377/03 ; declared. 12.01.15 ; publ. 10.05.16, Byul. № 13. 5 p.
12. Device for plunging piles : auth. sert. № 1245656. USSR. № 3790987/29-33 ; declared. 11.09.84 ; publ. 23.07.86. Bull. № 27, 1986. 5 p.
13. Inertial engine : auth. sert. № 939817 of the USSR. № 2872903/25-06 ; declared 22.01.80 ; publ. 30.06.82. Bull. № 24. 5 p.