

УДК 621.5.041

## Об угле обрезки спиралей компрессора

Канд. техн. наук В. А. КОСАЧЕВСКИЙ

vakos32@yandex.ru

Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского

*Исходя из принципа действия спиральной машины, отмечаются особенности системы ее спиральных рабочих органов в зависимости от вида базовых геометрических кривых для построения спиралей, рассматриваются различные подходы к моделированию центральной части спирального компрессора, проводится сравнительный анализ влияния наличия либо отсутствия сопряжений ребер спиралей на эффективность спиральной машины, используемой в различных вариантах. Анализируются схемы обрезки спиралей с целью упрощения конструкции спиральной машины. Вводится и обосновывается понятие минимального критического угла обрезки спиралей. Приводится вариант числового расчета такого угла, который иллюстрирует применение изложенного аналитического метода на примере оценки корректности некоторых расчетных работ. В заключение делается вывод о необходимости корректной оценки нижней границы угла обрезки спиралей при проектировании и предлагается использовать с этой целью полученное соотношение.*

**Ключевые слова:** спиральные компрессоры (СПК), спиральные машины, области применения СПК, геометрия спиральной машины, сопряжения ребер спиралей, моделирование центральной части, угол обрезки спиралей, критерий минимального угла.

---

### Информация о статье:

Поступила в редакцию 27.05.2019, принята к печати 16.09.2019

DOI: 10.17586/1606-4313-2019-18-4-37-41

Язык статьи — русский

### Для цитирования:

Косачевский В. А. Об угле обрезки спиралей компрессора // Вестник Международной академии холода. 2019. № 4. С. 37-41.

---

## On the cut-off angle for the scroll compressor wrap

Ph. D. V. A. KOSACHEVSKY

vakos32@yandex.ru

Military space academy of A. F. Mozhaysky

*The operation principles of a scroll machine are described. Peculiarities of the scroll wraps depending on the types of basic geometrical form of curves are discussed. Different approaches to simulating the central part of the compressor are considered. Comparative analyses of presence or absence of scroll wraps conjugation on the efficiency of the compressor used in various modes is carried out. Various modeling methods of a central part of a scroll machine are considered. The scroll cut-off schemes are analyzed to simplify the design of scroll compressor. The idea of critical minimal cut-off angle is introduced and substantiated. An example of numerical calculation for the angle is presented, which illustrates the use of the analytical method in question exemplified by evaluating the correctness of calculation for several projects. The necessity of correct estimation for the bottom line of scroll cut-off angle in the design is proved and the obtained equation is proposed to be used for the purpose.*

**Keywords:** scroll machines, scroll compressors, fields of application, scroll machine geometry, modeling central parts, scroll wraps conjugation, scroll cut-off angle, minimum angle criterion.

---

### Article info:

Received 27/05/2019, accepted 16/09/2019

DOI: 10.17586/1606-4313-2019-18-4-37-41

Article in Russian

### For citation:

Kosachevsky V. A. On the cut-off angle for the scroll compressor wrap. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2019. No 4. p. 37-41.

---

### Введение

В 80-х годах прошлого века появился и стал широко известен так называемый спиральный компрессор (СПК),

отличавшийся массой преимуществ перед ранее производимыми компрессорами. В сочетании с новизной и поразительной простотой конструкции это обеспечило

спиральному компрессору огромную популярность, и тут же его производством занялись во многих технически развитых странах, прежде всего в Японии, США, ФРГ, Бельгии, Швейцарии и т. д.

По сведениям из различных источников, идея создания СПК высказывалась еще в XIX веке, но первый официально зарегистрированный патент на спиральный компрессор получил Leon Creux в США в 1905 г. [1]. Пальму первенства в промышленном производстве СПК, однако, следует отдать японской Hitachi Ltd, которая выпустила первые образцы СПК в 1983 году [2]. До этого времени просто не существовало механико-технологической базы для выпуска столь наукоемкой продукции. Спиральный компрессор является чрезвычайно высокотехнологичной, наукоемкой продукцией нового поколения. Его серийное производство требует мощной научно-технической базы и высокого уровня подготовки производства. Особое внимание должно уделяться аналитическим методам подхода к разработке СПК и моделированию рабочего процесса.

Принцип работы СПК исключительно прост. Он сводится к взаимодействию двух зеркально-симметричных рабочих спиралей, одна из которых (А) закреплена, а вторая (В) подвижна (рис. 1). Более подробно схема

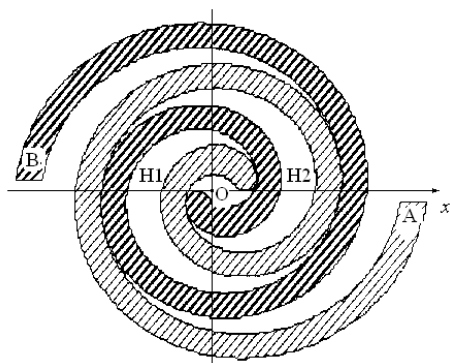


Рис. 1. Система спиралей

Fig. 1. The system of scrolls

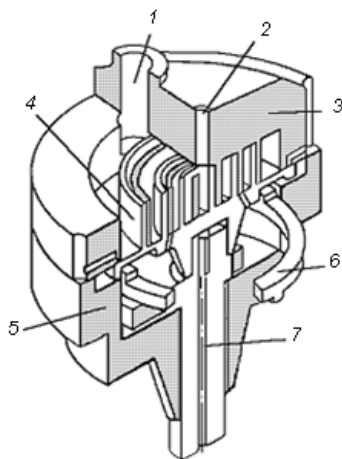


Рис. 2. СПК в разрезе: 1 — патрубок всасывания; 2 — отверстие нагнетания; 3 — неподвижная спираль; 4 — подвижная спираль; 5 — корпус СПК; 6 — диск противоповоротного устройства; 7 — приводной вал

Fig. 2. Scroll compressor: 1 — indraft nozzle; 2 — discharge inlet; 3 — fixed scroll; 4 — unfixed scroll; 5 — shell; 6 — anti-turn disk; 7 — drive shaft

описывается в работе [3]. Схематический вид СПК в вертикальном исполнении представлен на рис. 2:

Построение образующих спиралей на основе различных геометрических кривых рассматривались многими авторами. Наиболее фундаментальными теоретическими работами по этой тематике в российской периодике, по нашему мнению, следует считать [4–6], в иностранной — работы [7, 8]. В этих работах впервые были получены аналитические выражения, позволившие рассчитать контуры рабочих элементов СПК, а также разработана математическая модель рабочего процесса спирального компрессора [6] для одной из основных базовых геометрических кривых, Архимедовой спирали. Стоит упомянуть, что практически во всех случаях при конструировании спиральных компрессоров в настоящее время используются лишь спираль Архимеда и эвольвента круга.

Заметим, что в подавляющем большинстве внимание уделяется в основном проблемам профилирования *образующих пера* спирали [3, 9], но часто остается в тени формирование *концевых частей*, расположенных в центре системы спиралей. Нередко это происходит потому, что не желающие связываться с достаточно сложными математическими выкладками и расчетами конструкторы предпочитают просто вырезать центральную часть системы спиралей, либо зеркально-симметрично обрезать спирали по лучу, исходящему из полюса (рис. 3), подобно тому, как это сделано в работах [10, 11], либо в виде некоторого круга (рис. 4) достаточно большого радиуса [12, 13].

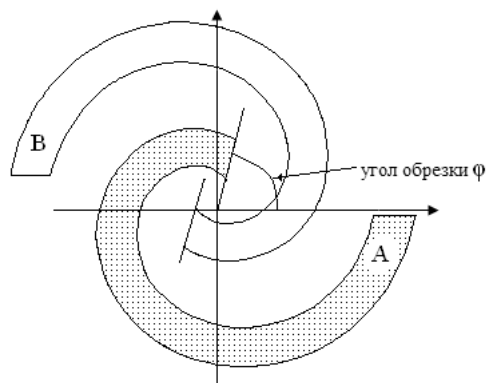


Рис. 3. Обрезка спирали по полярному лучу

Fig. 3. Scroll cutting-off by polar ray



Рис. 4. СПК с вырезанной в виде круга центральной частью

Fig. 4. Scroll compressor with circular-cut central part

В работе [9] проанализированы преимущества и недостатки этих двух подходов к моделированию центральной части системы спиралей. При этом отмечалось, что в случае использования спиральной машины в качестве компрессора, оптимальных результатов работы СПК можно добиться, профилируя центральную часть с помощью сопряжений, которые можно рассчитать разными способами в зависимости от вида используемой кривой. Соответствующие методы выполнения таких сопряжений были разработаны ранее [5, 6]. Тем не менее, в том случае, когда спиральная машина используется в качестве пневмомотора или детандера [12], [14–16], такое полноценно выполненное сопряжение концевых частей спиралей уже не является неперенным условием для достижения наилучших результатов работы спиральной машины. Напротив, в этих случаях могут быть использованы методы удаления центральной части системы спиралей.

### О некоторых важных условиях при обрезке спиралей

Обрезка спиралей может быть произведена разными способами. В частности, спирали могут быть обрезаны по полярному лучу (см. рис. 3). При этом следует учитывать, что контакт образующих поверхностей спиралей, гарантирующий герметичность полостей СПК, сохранится в случае, если полярный угол  $\varphi$  обрезавшего луча будет *заведомо больше*, чем полярный угол  $\varphi_*$  точки перехода  $M_*$ , отделяющей перо спирали от ее концевой участка (см. [5]). Иначе говоря, *должен существовать некий полярный угол*, который можно назвать критическим. При обрезке спиралей под углом, меньшим критического, концы спиралей могут зацепляться друг за друга, и работа спиральной машины может оказаться невозможной.

Здесь необходимо заметить, что подобных оценок ранее не приводилось, поскольку считалось очевидным, что всегда можно просто вырезать достаточно большую центральную часть системы спиралей и тем самым устранить угрозу заклинивания. Однако, при детальном рассмотрении проблема выглядит не столь простой. Рассмотрению этого вопроса и посвящена данная работа.

### Результаты моделирования

По некоторой приведенной нами ранее оценке [9], при обрезке спиралей по полярному углу, если в качестве образующей взята Архимедова спираль, полярный угол обрезки концевых частей  $\varphi_*$  должен удовлетворять следующему соотношению:

$$\varphi_* \geq \varepsilon / 2r_0, \quad (1)$$

где  $r_0$  — шаг спирали Архимеда;  $\varepsilon$  — эксцентриситет системы спиралей.

Если обрезать спирали по полярному углу, не учитывая (1), то это может привести к заклиниванию спиралей и нарушению работы спиральной машины.

Покажем справедливость этого соотношения, рассмотрев условия обрезки спиралей по полярному углу. Уравнение Архимедовой спирали в полярных координатах имеет следующий вид:

$$r = r_0 \varphi, \quad (2)$$

где  $r$  — полярный радиус;  $r_0$  — шаг спирали;  $\varphi$  — полярный угол, отсчитываемый от полярной оси против часовой стрелки в положительном направлении. Обратимся теперь к рис. 5, на котором показан момент контакта концевых частей спиралей при орбитальном угле  $\theta = \pi - \varphi_*$ .

Легко заметить, что полярный радиус точки контакта  $M_*$  равен радиусу орбиты  $r_* = \varepsilon$ , а из уравнения (2) следует:

$$\varphi_* = \varepsilon / r_0. \quad (3)$$

Очевидно, если обрезать спирали по полярному углу  $\varphi_*$ , то контакта между концевыми частями спиралей при таком орбитальном угле не будет вообще (см. рис. 6).

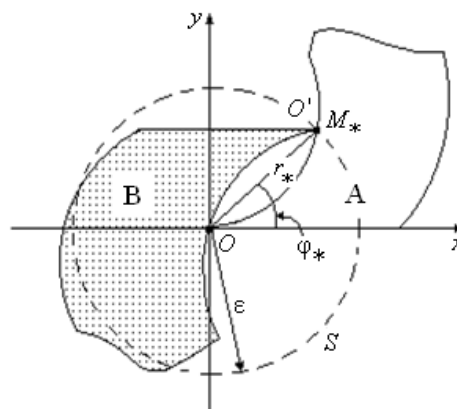


Рис. 5. Момент контакта концевых частей спиралей при орбитальном угле  $q = \pi - \varphi_*$ : A, B — неподвижная и подвижная спирали; O — полюс; O' — начало подвижной спирали; S — орбита точки O';  $\varepsilon$  — радиус точки O';  $M_*$  — точка контакта внутренних образующих;  $r_*$ ,  $\varphi_*$  — ее полярные координаты

Fig. 5. The contact point of scroll ends at orbital angle  $q = \pi - \varphi_*$ : A, B — unfixed and fixed scrolls; O — pole; O' — the start of unfixed scroll; S — O' point orbit;  $\varepsilon$  — O' point radius;  $M_*$  — inner moving parts' contact point;  $x$ ,  $r_*$ ,  $\varphi_*$  — its polar coordinates

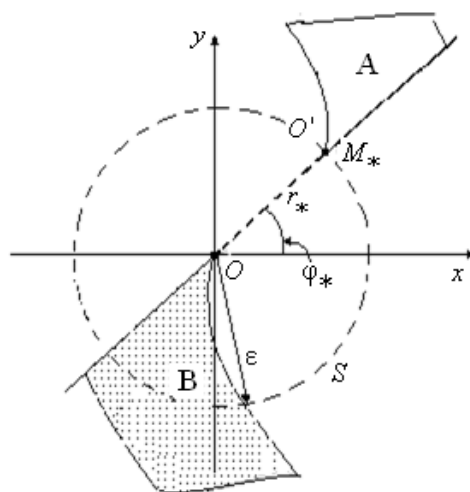


Рис. 6. Вид центральной части после обрезки при  $\varphi_* = \varepsilon / r_0$

Fig. 6. The central part after cutting-off at  $\varphi_* = \varepsilon / r_0$

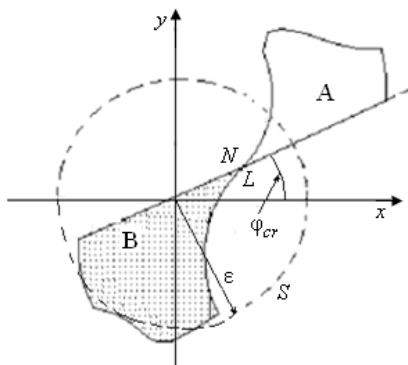


Рис. 7. Вид центральной части системы после обрезки по полярному углу  $\varphi_{cr} = \varepsilon / 2r_0$

Точки L и N — концы спиралей после обрезки

Fig. 7. The central part of the system after cutting-off by polar angle  $\varphi_{cr} = \varepsilon / 2r_0$ . L and N — scroll end after cutting-off

Найдем такой минимально возможный критический угол обрезки  $\varphi_{cr}$ , при котором будет в принципе исключена сама возможность заклинивания концов спиралей, т. е., такой угол, при котором концы спиралей проходят без зацепления, лишь геометрически номинально касаясь друг друга. Исходя из этих соображений, перенесем (см. рис. 6) предполагаемую виртуальную точку контакта внутренних образующих спиралей на середину отрезка  $OO'$ . Тогда соотношение (3) может быть записано в виде:

$$\varphi_{cr} = \varepsilon / 2r_0. \quad (4)$$

Отметим, что при этом угол обрезки уменьшится вдвое по сравнению с углом, определяемым соотношением (3). Теперь концы спиралей (точки L и N на рис. 7) будут лишь виртуально соприкасаться при орбитальном угле  $\theta = \pi - \varphi_{cr}$  без зацепления и тем более без заклинивания спиралей. Если же обрезку спиралей производить при угле, меньшем, чем  $\varphi_{cr}$ , то зацепления спиралей будет не избежать.

Учитывая выражения (1) и (4), получим следующее условие обрезки

$$\left. \begin{aligned} \varphi &\geq \varphi_{cr} \\ \varphi_{cr} &= \varepsilon / 2r_0 \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

т. е., полярный угол  $\varphi$ , под которым обрезаются концы спиралей, должен быть обязательно больше минимально возможного угла  $\varphi_{cr}$ , который получается из соотношения (4).

## Литература

1. Creux Leon. Rotary engine, Patent No 801182, USA, 1905.
2. Uchikawa N., Terada H., Arata T. Scroll compressors for air conditioners // Hitachi Rev. 1987. vol. 36. No 3. p. 155.
3. Косачевский В. А. О производительности спирального компрессора // Вестник Международной академии холода. 2016. № 4. с. 40–46.
4. Карпукhin Г. В., Сакун И. А. Построение конфигураций рабочих элементов спирального компрессора // Компрессорная техника и пневматика. 1994. № 4–5. с. 45.
5. Косачевский В. А. О геометрии рабочих элементов спирального компрессора // Компрессорная техника и пневматика. 1994. № 4–5. с. 49.

В качестве иллюстрации напомним количественные оценки, приводившиеся нами ранее [9]. Примем нередко используемые в моделях следующие параметры спирали Архимеда:  $r_0 = 3,185$  мм,  $\varepsilon = 4,000$  мм. Подобные параметры принимаются во многих расчетных моделях, в частности, они были приняты в [10, 11]. В цитируемых работах контуры спиралей рассчитывались по соотношениям, полученным нами ранее [5], но сопряжения спиралей не выполнялись. Для предупреждения заклинивания, спирали были обрезаны по полярному углу. Угол обрезки принимался равным  $\varphi = \pi/4$ . При указанных значениях параметров Архимедовой спирали угол  $\varphi_{cr} = 0,6279$ , или  $0,1999\pi$ . Поскольку  $\pi/4 > \varphi_{cr}$ , то соотношению (5) этот угол обрезки удовлетворяет. Таким образом можно утверждать, что полученное соотношение (4) дает вполне корректную оценку минимального полярного угла, другими словами представляет собой критерий, при учете которого возможна обрезка спиралей с целью предупреждения их зацепления и заклинивания.

## Закключение

До настоящего времени подобной оценки минимально возможного значения угла обрезки спиралей, исходящей не из эмпирических подборок, а из строгих математических методов аналитической и дифференциальной геометрии не проводилось. Полученные в настоящей работе соотношения (4) и (5) представляют собой достаточно жесткий критерий для обрезки спиралей по полярному лучу, который однозначно определяет минимально возможный угол обрезки. Введение такого минимального угла обрезки следует рассценивать как одно из важных условий при проектировании спиральных машин с удаленной центральной частью.

Следует отметить, что предпринятый в данной работе подход к выводу соотношений (4) и (5), несмотря на безусловную их справедливость, носит несколько произвольный характер (мы делим расстояние  $OO'$  пополам, но ведь можно исходить и из других соотношений). Поэтому возникает необходимость оценки введенного критического минимального угла также из других соображений, включающих рассмотрение уравнений обеих соприкасающихся кривых, что и будет проведено в последующем исследовании.

## References

1. Creux Leon. Rotary engine, Patent No 801182, USA, 1905.
2. Uchikawa N., Terada H., Arata T. Scroll compressors for air conditioners. Hitachi Rev. 1987. vol. 36. No 3. p. 155.
3. Kosachevsky V. A. Scroll compressors capacity. Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda. 2016. No 4. p. 40–46. (in Russian)
4. Karpukhin G. V., Sakun I. A. Creation of configurations of working elements of the spiral compressor. Compressor engineering and Pneumatics. 1994. No 4–5. p. 45. (in Russian)
5. Kosachevsky V. A. About geometry of working elements of the spiral compressor. Compressor engineering and Pneumatics. 1994. No 4–5. p. 49. (in Russian)

6. Косачевский В. А. О математической модели рабочего процесса спирального компрессора // Компрессорная техника и пневматика. 1997. № 1–2 (14–15). с. 40.
7. Bush J. W., Elson J. P. Scroll compressor design criteria for residential air conditioning and heat pump applications. Part I. Mechanics. Proc. ICEC at Purdue Univ., 1988, p. 83 // Part II. Design criteria. Ibidem, 1988. p. 93.
8. Bush J. W., Beagle W. P. Derivation of a general relation governing the conjugacy of scroll profiles // Hermetic Compressor Engineering, United Technology Carrier Corporation, Syracuse, New York 13221. Proc. ICEC at Purdue Univ., 1992, p. 1079.
9. Косачевский В. А. О моделировании центральной области спирального компрессора // Вестник Международной академии холода. 2018. № 3. с. 45–52.
10. Ефремов С. Н., Шестакович И. А. Профильный расчет образующих спиралей холодильного компрессора // Вестник СевГТУ. Серия: Механика, энергетика, экология. 2005. Вып. 67. с. 148–153.
11. Ефремов С. Н. Анализ перетечек хладагента в спиральных холодильных компрессорах // Вестник СевГТУ. Серия: Механика, энергетика, экология. 2008. Вып. 87. с. 107–110.
12. Ивлев В. И., Мисюрин С. Ю. Расчетные и экспериментальные характеристики спиральной машины, работающей в режиме газового мотора // Доклады Академии наук. 2017. т. 472. № 3. с. 278–281.
13. Bell, I., Groll, E. A., Braun, J. E., and King, G. Update on scroll compressor chamber geometry. International compressor engineering conference, Purdue, West Lafayette, IN. July 12–15, 2010, Paper No. 2033.
14. Orosz Matthew S., Mueller Amy V., Dechesne Bertrand J., Hemond Harold F. Geometric design of scroll expanders optimized for small organic Rankine cycles // Journal of engineering for gas turbines and power. April 2013. Vol. 135 (04). DOI: 10.1115/1.4023112
15. Accorsi Felipe A., James Nelson A., Groll Eckhard, Horton, William T., Braun James E. Experimental Testing and Modeling of 5 kW Oil-Free Open Drive Scroll Expander Using R245fa // International Compressor Engineering Conference, Purdue Univ., 2016, P. 2482.
16. Hesse Jan, Andres Rainer. CFD Simulation of a Dry Scroll Vacuum Pump Including Leakage Flows // International Compressor Engineering Conference, Purdue Univ., 2016, P. 2498.
6. Kosachevsky V. A. About mathematical model of working process of the spiral compressor. *Compressor engineering and Pneumatics*. 1997. No 1–2 (14–15). p. 40. (in Russian)
7. Bush J. W., Elson J. P. Scroll compressor design criteria for residential air conditioning and heat pump applications. Part I. Mechanics. Proc. ICEC at Purdue Univ., 1988, p. 83 // Part II. Design criteria. Ibidem, 1988. p. 93.
8. Bush J. W., Beagle W. P. Derivation of a general relation governing the conjugacy of scroll profiles. Hermetic Compressor Engineering, United Technology Carrier Corporation, Syracuse, New York 13221. Proc. ICEC at Purdue Univ., 1992, p. 1079.
9. Kosachevsky V. A. Modelling the central part of the scroll compressors. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2018. No 3. p. 45–52. (in Russian)
10. Efremov S. N., Shestakovich I. A. Profile calculation of the forming spirals of the refrigerating compressor. *Vestnik SevGTU. Seriya: Mekhanika, energetika, ekologiya*. 2005. No 67. p. 148–153. (in Russian)
11. Efremov S. N. The analysis of the leakages of the refrigerant in the scroll refrigeration compressors. *Vestnik SevGTU. Seriya: Mekhanika, energetika, ekologiya*. 2008. No 87. p. 107–110. (in Russian)
12. Ivlev V. I., Misyurin S. Yu. Design and experimental characteristics of the washing machine operating in the mode of a gas motor. *Reports of the Academy of Sciences*. 2017. vol. 472. No. 3. p. 278–281. (in Russian)
13. Bell, I., Groll, E. A., Braun, J. E., and King, G. Update on scroll compressor chamber geometry. International compressor engineering conference, Purdue, West Lafayette, IN. July 12–15, 2010, Paper No. 2033.
14. Orosz Matthew S., Mueller Amy V., Dechesne Bertrand J., Hemond Harold F. Geometric design of scroll expanders optimized for small organic Rankine cycles. *Journal of engineering for gas turbines and power*. April 2013. Vol. 135 (04). DOI: 10.1115/1.4023112
15. Accorsi Felipe A., James Nelson A., Groll Eckhard, Horton, William T., Braun James E. Experimental Testing and Modeling of 5 kW Oil-Free Open Drive Scroll Expander Using R245fa. *International Compressor Engineering Conference*, Purdue Univ., 2016, P. 2482.
16. Hesse Jan, Andres Rainer. CFD Simulation of a Dry Scroll Vacuum Pump Including Leakage Flows. *International Compressor Engineering Conference*, Purdue Univ., 2016, P. 2498.

### Сведения об авторе

#### Косачевский Валерий Аркадьевич

к. т. н., доцент кафедры математики Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13, vakos32@yandex.ru

### Information about author

#### Kosachevsky Valery Arkadievich

Ph. D., associate Professor of Department of mathematics of Military space academy of A. F. Mozhaysky, 197198, Russia, St. Petersburg, Zhdanovskaya str., 13, vakos32@yandex.ru