



УДК 621.5

А.А. Блажнов

**ВИХРЕВОЕ ВАКУУМНОЕ БЕСКОНТАКТНОЕ ЗАХВАТНОЕ УСТРОЙСТВО**

А.А. Blazhnov

**VORTEX VACUUM CONTACTLESS GRIPPER**

Описан принцип действия, разработана трехмерная модель и на ней исследовано вихревое вакуумное захватное устройство. По результатам численных экспериментов получены и проанализированы зависимости усилия удерживания плоского объекта от геометрических параметров вакуумной камеры и расхода рабочего газа. По результатам расчетов сформулированы рекомендации по проектированию вихревых захватных устройств.

АВТОМАТИЗАЦИЯ; ПРОМЫШЛЕННЫЕ РОБОТЫ; КЛАССИФИКАЦИЯ; ВАКУУМНОЕ ЗАХВАТНОЕ УСТРОЙСТВО; МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ; РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЙ; УДЕРЖИВАЮЩИЕ СИЛЫ; ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ; РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ.

The paper describes the operating principle and 3D-model of the vortex vacuum gripper. Based on the results of numerical experiments we have obtained and analyzed the dependency of holding force on the geometric parameters of the vacuum chamber and the working gas flow. According to the results we have formed recommendations on the design of vortex contactless vacuum grippers.

AUTOMATIZATION; INDUSTRIAL ROBOTS; CLASSIFICATION; VACUUM GRIPPER; MATHEMATICAL MODEL; PRESSURE DISTRIBUTION; RESTRAINING FORCES; NUMERICAL EXPERIMENTS; DESIGN RECOMMENDATIONS.

В современном автоматизированном производстве используются десятки и сотни различных робототехнических и мехатронных систем. При этом в технологических процессах возникает множество задач по манипулированию объектами производства. Промышленные манипуляционные системы применяются на самых разнообразных операциях и работают с деталями, различающимися по прочности, массе, габаритам, конфигурации, расположению центра масс, шероховатости поверхности. Детали могут быть изготовлены из различных металлов, керамики, стекла, пластмассы. Это могут быть и массивные поковки, и крупногабаритная тара из пластмассы, стальные листы, кирпич, листы из стекла и стеклянные трубки.

Один и тот же робот может транспортировать собранные узлы, тару с насыпанными мелкими деталями, емкости с жидкостью и, кроме этого, работать различным инструментом — распылителем, гайковертом, пневмоотверткой. Поэтому обычно для каждой модели робота создается большое число всевозможных захватных устройств, которые при необходимости

легко и быстро заменяются и монтируются на конечное звено манипулятора. В некоторых конструкциях роботов захваты могут меняться автоматически в соответствии с записанной программой.

Нередко эффективность применения робота при выполнении тех или иных технологических операций определяется тем, насколько удачно выбрана конструкция захвата. Во многих случаях захваты должны приспосабливаться к изменению размеров детали после обработки.

Требования, предъявляемые к захватным устройствам:

- надежность захвата и удержания объекта;
- стабильность и точность базирования;
- удобство и безопасность работы;
- минимальная масса;
- быстродействие;
- экономичность;

универсальность, т. е. способность захватывать и удерживать заготовки в широком диапазоне типоразмеров;

высокая гибкость — легкая и быстрая переналадка или смена захватного устройства;

деликатность (существует множество технологических процессов, где недопустимо повреждение поверхностей, с которыми контактирует захватное устройство).

Различные комбинации этих критериев могут быть определяющими при решении той или иной задачи.

Созданием захватных устройств занимаются множество компаний с мировым именем, такие, как SMC PNEUMATIK, Festo, Fanuc, Bosch Rexroth. В частности Bosch и SMC выпускают и бесконтактные захватные устройства.

### Формулировка проблемы

Сочетание отталкивающего и притягивающего усилия в газодинамическом потоке позволяет создавать вакуумные устройства, удерживающие предмет производства бесконтактно. Бесконтактное удержание может представлять интерес для технологических процессов, например в полупроводниковой промышленности при производстве чипов, ячеек солнечных батарей [3] и полупроводниковых элементов. Исходные заготовки представляют собой тонкие кремниевые пластины, толщина которых может быть 100 и менее микрон. На поверхность этих пластин в технологической последовательности наносятся различные реагенты, растворы, диффузаны. Все операции проводятся в чистых камерах при помощи приспособлений, позволяющих избежать загрязнения поверхности пластин.

Удерживать и перемещать чистые тонкие кремниевые пластины при помощи механических захватных устройств сложно [4]. При силовом воздействии во время удержания пластина деформируется и может сломаться, высока и вероятность повредить поверхность или боковую кромку, что также недопустимо. Вакуумные захватные устройства, в которых отсутствует контакт с захватываемой поверхностью, представляют собой оптимальное решение для перемещения таких хрупких объектов или объектов с особо чистыми поверхностями.

### Вихревой эффект

В основе конструкции использован вихревой эффект, известный как эффект Ранка. В 1931 году Жозефом Ранком был открыт вихревой эффект энергетического разделения газов. Кажущийся внешне простым вихревой эффект включает в себе сложный газодинамический процесс, про-

исходящий в пространственном турбулентном потоке вязкого сжимаемого газа. На основе экспериментальных исследований были выведены полуэмпирические методики расчета вихревого эффекта в некоторых видах вихревых аппаратов [5]. Частью описанного Ранком эффекта является наличие при определенных условиях в приосевой области вихря пониженного абсолютного давления. Данная особенность вихревых течений и позволила создать вакуумное захватное устройство.

### Прототипы вихревого захватного устройства

Известны вакуумные захватные устройства, где в качестве генератора вакуума использована вихревая камера. На рис. 1 представлено захватное устройство с пневматическим вихреобразованием и замкнутой вихревой камерой. В данной конструкции вихрь непосредственно не контактирует с предметом производства 4.

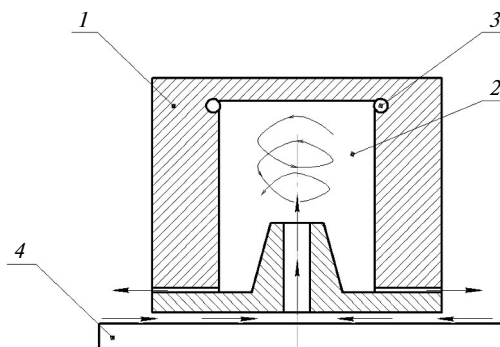


Рис. 1. Вихревой вакуумный захват

В корпус 1 вакуумной камеры через тангенциально направленные сопла 3 подается сжатый газ. При этом в вакуумной камере 2 образуется вихревое течение с пониженным давлением в центральной части. Избыток сжатого воздуха выходит из боковых отверстий в нижней части корпуса. Подобные захватные устройства можно отнести к вакуумным активным захватам со встроенным генератором вакуума вихревого типа.

Также известны бесконтактные захватные устройства, основанные на эффекте Бернулли (рис. 2). Поток рабочего газа протекает через кольцевой зазор между корпусом 1 и рассекателем 2 и выходит в атмосферу. Каналы, образованные корпусом, рассекателем и предметом

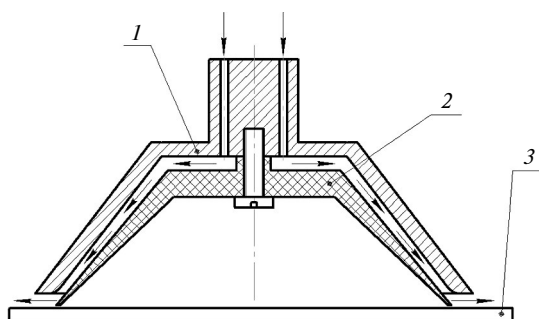


Рис. 2. Вакуумный захват на основе эффекта Бернулли

производства образуют кольцевой эжектор с областью пониженного давления в центре рассекающего. Таким образом, выходящий поток образует воздушную подушку отталкивающую объект манипуляции, а разрежение внутри рассекающего создает подъемное усилие.

Присоски Бернулли используют прямолинейно движущийся скоростной поток рабочего газа, также вытекающий через кольцевой зазор между корпусом рабочей камеры и объектом манипулирования. При этом в центре камеры согласно закону Бернулли есть область с пониженным абсолютным давлением, образованным за счет высокого скоростного напора на периферии.

#### Вихревое бесконтактное захватное устройство

Исследуемое захватное устройство состоит из вихревой камеры, в которую тангенциально через сопла, встроенные в стенки камеры, подается рабочий газ (рис. 3).

При этом внутри камеры возникает кольцевой вихрь с разреженным давлением в области близкой к оси вихря и избыточным давлением в кольцевом зазоре между захватом и удерживаемой поверхностью. Избыточное давление создается за счет потока газа, выходящего из вихревой камеры в атмосферу [1, 5]. В результате эпюра усилия  $F_p$ , действующего на объект со стороны захвата, имеет вид, представленный на рис. 4.

Таким образом, захват создает, помимо удерживающего усилия, еще и газовую «подушку» между стенками вихревой камеры и переносимой деталью, что дает возможность избежать контакта между ними.

Захват позволяет манипулировать объектом, удерживая его бесконтактно или с минимальным контактом.

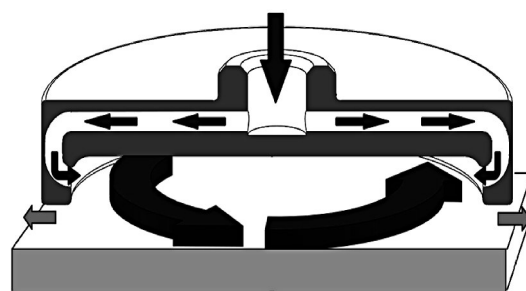


Рис. 3. Принцип действия вихревого вакуумного бесконтактного захвата

Условие удержания захватом объекта определяется равновесием между следующими силами: силой тяжести, динамическими нагрузками при перемещении объекта, отталкивающей силой от избыточного давления в вихревой камере на ее периферии, силой притяжения от разрежения в центре вихревой камеры захвата.

В вихревом захватном устройстве на частицы газа в рабочей камере действуют две противоположно направленные и уравновешивающие друг друга силы: центробежная в направлении от оси камеры и сила, возникающая в результате действия градиента давлений. Как только центробежная сила становится больше в области у оси вихря, абсолютное давление снижается.

Положительное давление наблюдается только в очень небольшой пристенной области камеры и в кольцевом зазоре между корпусом камеры и объектом манипулирования. В остальной области вихря абсолютное давление ниже атмосферного.

В результате применения этой конструкции эффективность вихревого устройства оказывается выше, чем у захвата на основе эффекта Бернулли [2].

#### Цели и методы проведения исследований

При проведении исследований были поставлены следующие цели: оптимизация конструкции вакуумного бесконтактного вихревого захватного устройства, поиск оптимальных геометрических и газодинамических параметров захватного устройства и снижение расхода сжатого газа при сохранении подъемного усилия.

Для достижения поставленных целей в работе использовались средства автоматизиро-

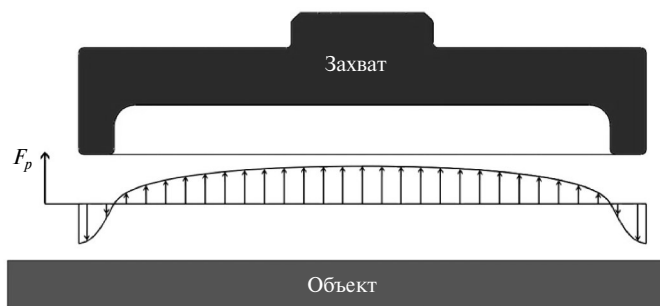


Рис. 4. Удерживающее усилие, действующее на объект

ванного проектирования, методы численного эксперимента на основе конечно-элементной модели вакуумного бесконтактного вихревого захватного устройства в среде вычислительно-программного комплекса ANSYS FLUENT.

Исследовалась виртуальная модель захвата, использующего вихревой эффект, со следующими параметрами: диаметр рабочей камеры  $D = 50\text{--}75$  мм, число сопел  $n = 4$ , диаметр сопел  $d = 2$  мм, подводимое давление  $P = 0,4$  МПа, зазор  $h$  между деталью и захватами — постоянный (2 мм).

При помощи решения вспомогательных простейших задач была сформирована конечно-элементная модель среды внутри вакуумной камеры захвата, выбраны граничные условия, рассчитаны параметры модели турбулентности.

Хочется отметить, что решаемая задача относится к разновидности осесимметричных, что позволяет рассчитывать в данной задаче  $1/4$  ваку-

умной камеры (по числу сопел). Данный прием позволил в 4 раза снизить объем вычислений.

### Основные результаты

Важнейший результат расчета — кривые распределения давления вдоль радиуса вихревой камеры. График распределения для вакуумной камеры диаметром 50 мм представлен на рис. 5.

Для удобства сравнения устройств с различными геометрическими параметрами радиус камеры приведен к безразмерному виду. При этом 0 — это ось камеры, а 1 — это максимальный диаметр камеры. По полученной кривой рассчитывалось среднее давление в рабочей камере и удерживающее усилие захватного устройства.

В ходе проведения исследований получены графики изменения давления в рабочей камере в зависимости от ее диаметра  $D$ . Пример подобного графика представлен на рис. 6 (для диаметра подводящих сопел 2 мм).

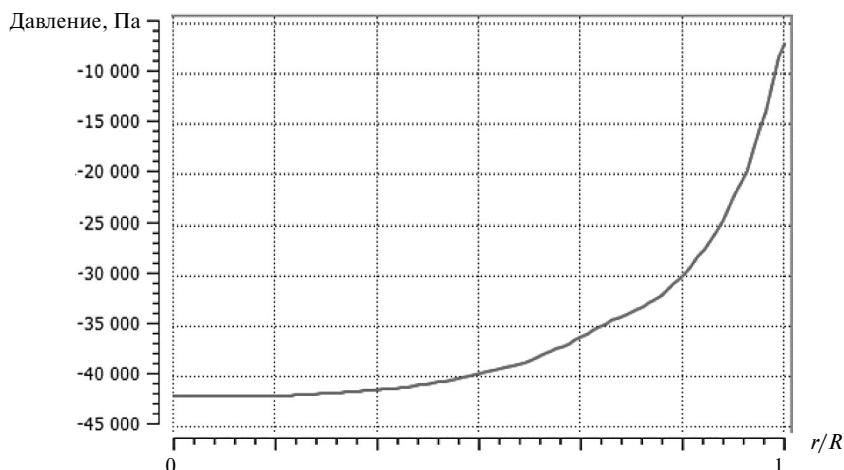


Рис. 5. График изменения абсолютного давления в радиальном направлении от центра камеры к периферии

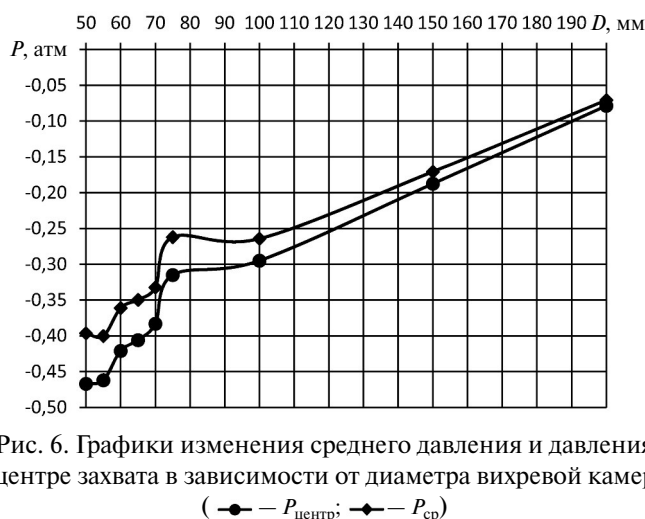


Рис. 6. Графики изменения среднего давления и давления в центре захвата в зависимости от диаметра вихревой камеры (● —  $P_{\text{центр}}$ ; ◆ —  $P_{\text{ср}}$ )

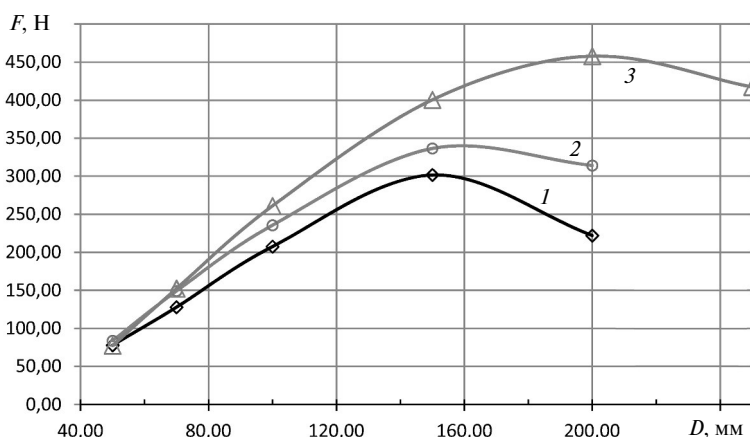


Рис. 7. Зависимости удерживающих усилий от диаметра  $D$  камеры захвата и диаметра сопел (1 — 2; 2 — 2,5; 3 — 3 мм)

График изменения удерживающего усилия захвата имеет вид, представленный на рис. 7.

По графику легко заметить, что для диаметра сопла  $d = 2$  мм оптимальным диаметром камеры является размер близкий к значению  $D = 150$  мм. В этом случае захватное устройство может статически удерживать груз с массой порядка 29 кг.

Достоверность результатов исследования подтверждалась высокой степенью адекватности математической модели, построенной с использованием вычислительного программного комплекса ANSYS FLUENT. Обоснованием независимости результатов численного эксперимента от разбиения модели на элементы (сеточная зависимость) — хорошее соответствие результатов расчета удерживающей силы вихревого захватного устройства значениям, полученным с использованием реальной модели.

### Предложения и выводы

В результате проведенного исследования получены несколько оптимальных соотношений геометрических параметров вихревого захватного устройства (приведены в таблице).

#### Оптимальные геометрические параметры вихревого захватного устройства

Диаметр сопла, мм	Диаметр рабочей камеры, мм	Экстремальное удерживающее усилие, Н
2	150	290
2,5	160	340
3	200	460

При использовании геометрии рабочей камеры, близкой к оптимальной, линии тока в ка-

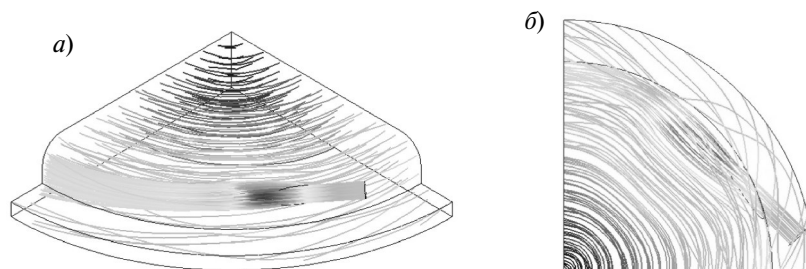


Рис. 8. Вид линий токаа вихря внутри вакуумной камеры захватного устройства

мере концентричны, наблюдается ровный кольцевой вихрь рис. 8, а).

При неизменных характеристиках сопел бесконечное увеличение диаметра захватного устройства не влечет за собой увеличения удерживающей силы, т. к. в этом случае подводимой энергии не хватает для раскручивания вихря и среднее давление в камере начинает подниматься. Зазор между предметом производства и деталью увеличивается, система становится нестабильной и распадается.

При возрастании расходных характеристик рабочего газа экстремум смещается в область больших диаметров и позволяет получить большие удерживающие усилия. При больших расходах и малых диаметрах захвата подъемная

сила, наоборот, уменьшается из-за искажения круговой формы линий тока (рис. 8, б). Поэтому нецелесообразно использовать сопла с большим расходом сжатого воздуха в захватных устройствах с малым диаметром рабочей камеры.

Представленные результаты позволяют проектировать захваты с оптимальными размерами вихревой камеры, вносят вклад в дальнейшее развитие методов расчета и проектирование вакуумных бесконтактных захватных устройств, входящих в состав робототехнических и мехатронных систем и машин.

В ходе работ были также детально рассмотрены пограничные слои в рабочей камере и картина вторичных течений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа: Учеб. для вузов. 7-е изд., испр. М.: Дрофа, 2003. 840 с.
2. Прандтль Л. Гидроаэромеханика. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. 576 с.
3. Патент №2043193 РФ, МПК В 25 J15. Вакуумный захват / Краснослободцев В.Я., Сергиенко А.Г.; заявитель и патентообладатель — В.Я. Краснослободцев: заявл. 03.12.1990; опубл. 10.09.1995, Бюл. № 25 12 с:ил.
4. Козырев Ю.Г. Захватные устройства и инструменты промышленных роботов. М.: КНОРУС, 2010. 312с.
5. Бушунов Б.Н. Производственные машины автоматы. Л.: Машиностроение, 1973. 360 с.
6. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. М.: Москва, 1969. 185с.
7. Челпанов И.Б., Колпашников С.Н. Схваты промышленных роботов.Л.: Машиностроение, 1989. 287 с.
8. Патент №88775 СССР, МПК 27с, 15о, 59с, 16. Вихревой эжектор / М.Г. Дубинский, С.З. Копелев и А.О. Мацук; заявитель и патентообладатель — М.Г.Дубинский; заявл. 25.10.1946; опубл. 01.011950, 2с:ил.
9. Гольдштик А.М. Вихревые потоки. Новосибирск: Наука, 1981. 268 с.
10. Суслов А.Д., Иванов С.В. Вихревые аппараты. М.: Машиностроение, 1985. 256 с.
11. Chengming Gao Experimental Study on the Ranque-Hilsch Vortex Tube, ISBN 90–386–2361–5, Technische Universiteit Eindhoven. 2005. P. 159.
12. Patent US, no. 1.952.281. Method and Apparatus for Obtaining from Fluid Under Pressure Two Currents of Fluids at Different Temperatures / G.J. Ranque. 1934.

## REFERENCES

1. **Loytsyanskiy L.G.** Mekhanika zhidkosti i gaza. Ucheb. dlya vuzov. 7-ye izd., ispr. M.: Drofa, 2003. 840 s. (rus.)
2. **Prandtl L.** Gidroaeromekhanika. Izhevsk: NITs «Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika», 2000. 576 s. (rus.)
3. **Patent №2043193 Rossiyskoy federatsii.** Vakuurnyy zakhvat / Krasnoslobodtsev V.Ya., Sergiyenko A.G. 1995 (rus.)
4. **Kozyrev Yu.G.** Zakhvatnyye ustroystva i instrumenty promyshlennykh robotov. M.: KNORUS, 2010. 312 s. (rus.)
5. **Bushunov B.N., Bezhanov B.B.** Proizvodstvennyye mashiny avtomaty. L.: Mashinostroyeniye, 1973. 360 s. (rus.)
6. **Merkulov A.P.** Vikhrevoy effekt i yego primeneniye v tekhnike. M.: Moskva, 1969. 185 s. (rus.)
7. **Chelpanov I.B., Kolpashnikov S.N.** Skhvaty promyshlennykh robotov L.: Mashinostroyeniye, 1989. 287s. (rus.)
8. **Patent №88775 SSSR. MPK 27s, 150, 59s, 16.** «Vikhrevoy ezhektor»/ M. G. Dubinskiy, S.Z. Kopelev i A.O. Matsuk. (rus.)
9. **Goldstik A.M.** Vikhrevyye potoki. Novosibirsk: Nauka, 1981. 268 s. (rus.)
10. **Suslov A.D., Ivanov S.V.** Vikhrevyye apparaty. M.: Mashinostroyeniye, 1985. 256 s. (rus.)
11. Chengming Gao Experimental Study on the Ranque-Hilsch Vortex Tube, ISBN 90-386-2361-5, Technische Universiteit Eindhoven, 2005. P. 159.
12. **U.S. Patent №1.952.281.** Method and Apparatus for Obtaining from Fluid Under Pressure Two Currents of Fluids at Different Temperature / Ranque G.J. 1934.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОР

**БЛАЖНОВ Александр Андреевич** — аспирант Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: aablazhnov@gmail.com

## AUTHOR

**BLAZHNOV Aleksandr A.** — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: aablazhnov@gmail.com