

УДК 621.315.375

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЫТА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЕТРОГЕНЕРАТОРОВ***И. Г. Попова, В. Б. Кравцов, Е. С. Камелина, И. А. Гребенюк*

Донской государственной технической университет (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Рассматривается опыт эксплуатации ветрогенераторов в качестве одного из средств возобновления энергии, что относится к числу приоритетных задач современной энергетики. Обсуждается показатель использования номинальной мощности как параметр оценки эффективности ветрогенераторов. Проанализирована эффективность отечественных ветроэлектростанций (ВЭС) на базе установки ВЭУ-М-3/5. Обоснована необходимость учета нестационарности воздушных потоков в конструкции ветроустановок. Показано, что при превышении максимального значения скорости ветра целесообразно использование электромагнитного торможения турбины.

**Ключевые слова:** ветрогенератор, энергоэффективность, возобновляемые источники энергии, коэффициент использования установленной мощности, альтернативная энергия, ветроиндустрия, сила ветра.

**RESEARCH OF EXPERIENCE OF USING WIND GENERATORS***I. G. Popova, V. B. Kravtsov, E. S. Kamelina, I. A. Grebenyuk*

Don State Technical University, (Rostov-on-Don, Russian Federation)

The paper examines the experience of using renewable energy sources such as wind turbines, which is one of the priority tasks of modern energy. The indicator of the use of the rated power is discussed as a useful parameter for assessing the efficiency of wind turbines. The paper analyzes the efficiency of domestic wind power plants based on the installation VEU-M-3/5. The necessity of taking into account the nonstationarity of airflows in the very design of wind turbines is revealed. It is shown that when the maximum wind speed is exceeded, it is expedient to use electromagnetic braking of the turbine.

**Keywords:** wind generator, energy efficiency, renewable energy sources, installed capacity utilization factor, alternative energy, wind industry, wind power.

**Введение.** В связи с непрерывным ростом потребности в энергии, исчерпаемостью запасов полезных ископаемых, актуальной является проблема использования альтернативных источников энергии, в частности, ветрогенераторов. Энергетика воздушных потоков в последнее время стала эффективно развиваться и по объему производства альтернативной энергии занимает первое место, опережая фотовольтаику.

В настоящее время наблюдается возрастающий интерес к автономным автоматизированным ветрогенераторам, которые могут удовлетворять потребности жилья в электроэнергии. Авторы рассмотрели опыт использования ветрогенераторов, их эмерджентность в системах производства энергии России и за рубежом [1, 2].

**Основная часть.** Электроснабжение дома должно соответствовать следующим условиям: генератор должен вырабатывать переменный ток напряжением 220 В с частотой 50 Гц; в поставках энергии не должно быть перебоев. Воздушные потоки нестационарны, поэтому необходима система равномерного накопления и использования энергии. В частности, необходимы инверторы «постоянный — переменный ток», а также «умные» аккумуляторы,

запасающие энергию при широком разбросе значений силы тока, вырабатываемого ВЭС. Разработка таких устройств позволит сократить энергопотери [3].

Российская ассоциация ветроиндустрии считает, что географическое расположение России делает ветроэнергетику одним из наиболее перспективных направлений обеспечения альтернативными источниками энергии, поэтому представляет интерес опыт других стран в данном направлении. Огромная территория России предоставляет возможности как для испытания энергосистем с использованием ВЭС, так и для наиболее эргономичного их использования. Мощность генерируемой ветровой энергии предположительно составляет свыше 6,2 ТВт·ч. Это в 5 раз выше уровня производства электроэнергии в Российской Федерации в настоящее время. Согласно опубликованному Евросоюзом (ЕС) в 2010 г. энергетическому сценарию, к 2020 г. на долю ветроэнергетики в ЕС уровень мощности должен составлять 136 ГВт [4].

Главная трудность в производстве электроэнергии на ВЭС — это непостоянство силы ветропотока. Второй проблемой является дороговизна ветрогенераторов и комплектующих их изделий. Кроме того, высокий уровень шума ВЭС является не до конца решенной проблемой, т. к. затраты на шумоподавление сопоставимы со стоимостью электроэнергии, производимой этой установкой. В принципе, эта проблема решается путем удаления установок на расстояния, где шум уменьшается до 40 и менее децибел. И еще одна проблема — низкочастотные шумы ВЭС вносят помехи в работу ТВ-станций и других систем коммуникаций.

Тем не менее, неоспоримы такие преимущества электроэнергии, производимой на ВЭС, как:

- высокая экологичность;
- конкурентоспособность с другими электроэнергетическими производствами;
- практическая неисчерпаемость источников.

Представляет интерес оценка возможности использования ветрогенераторов для обеспечения энергетической автономности жилья в наиболее благоприятных условиях Крыма, где средняя скорость ветра достигает 7 м/с. Для такой оценки необходимо учитывать коэффициент использования мощности. Расчеты при проектировании ВЭС традиционно приводят к заниженным оценкам необходимых финансовых ресурсов, т. к. не учитываются расходы на инфраструктуру ветроэнергетических комплексов. В частности, один из важных показателей — объем инвестиций в расчете на единицу мощности — оказывается в 2 и более раз ниже.

Для действующих на сегодняшний день ветроэлектростанций коэффициент использования установленной мощности в среднем составляет около 20 %. Для сравнения: по угольным тепловым электростанциям в среднем он составляет порядка 35 %. Коэффициент использования установленной мощности оказывает влияние на себестоимость произведенной электроэнергии. Основная причина низкого коэффициента отдачи номинальной мощности на ветровых электростанциях связана с неустойчивостью ветра. Отсюда следует, что необходимо повысить коэффициент использования установленной мощности ВЭС, чтобы их эффективность могла стать сопоставимой с эффективностью тепловых электростанций, к которым относятся и АЭС.

Наиболее благоприятные условия для развития ветроэнергетики имеются в прибрежных регионах, где среднегодовая сила ветра порядка 7 м/с. В России к таким зонам относятся побережья морей Тихого и Северного Ледовитого океанов. Так, Байкальский регион богат ресурсами угля, гидроэнергии, нефти и газа. Поэтому создание ветропарков здесь может быть целесообразным лишь при обеспечении экономической эффективности или этот вид энергии может быть актуальным для районов, где нет централизованного электроснабжения. Создание ветропарков для Забайкалья при наличии необходимых метеоусловий в части среднегодовой силы

ветра следует считать оправданным. Вертикальное исполнение ветровых турбин не является кардинальным решением, несмотря на то, что они приводятся в движение ветрами с гораздо меньшей скоростью. Вместе с тем пороговое значение — 7 метров в секунду не может быть преодолено.

С увеличением расстояния от поверхности земли скорость ветра увеличивается, поэтому наблюдается рост строительства ветропарков на мачтах-опорах высотой 150 м с диаметром ротора 80–120 м при мощности около 20 МВт. Для вертикальных ветроагрегатов буревой предел составляет 50 м/с. С учетом этого деструктивного фактора возрастает роль вертикальных ветрогенераторов с рабочими органами турбореактивного типа. Они характеризуются относительно малым диаметром ротора и большим числом лопаток, для которых ветрового предела в принципе не существует.

В качестве объекта анализа энергоэффективности выбрана маломощная ветроэлектрическая установка ВЭУ-М-3/5, соответствующая по мощности предъявляемым требованиям. Параметры ее конструкции:

- три турбинные лопасти;
- угол между лопастями фиксирован;
- максимальная мощность — 2,8 кВт;
- диаметр лопастей не превышает 4,5 м;
- угловая скорость вращения — не более  $10 \text{ с}^{-1}$ ;
- вес установки около 60 кг.

Типовая конструкция такого индивидуального ветрогенератора представлена на рис. 1.

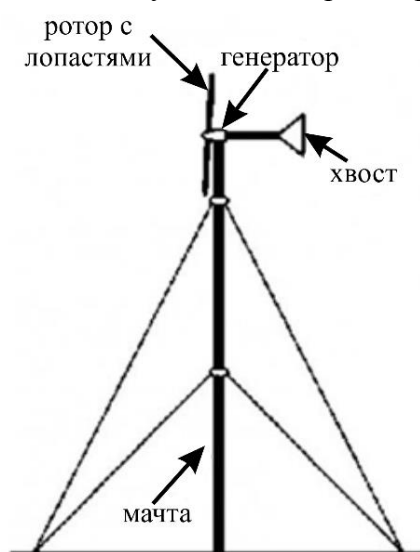


Рис. 1. Типовая конструкция индивидуального ветрогенератора

Безредукторный низкооборотный электрогенератор является основой этой ветроэнергетической установки. Генератор может включать до 24 пар полюсов. Постоянные магниты, образующие статор, выполняются на основе редкоземельных металлов.

Мощность ветрового потока  $P$  определяется скоростью ветра:

$$P = 0,5 \bar{v}^3 S \rho,$$

где  $\bar{v}$  — средняя скорость потока;  $S$  — площадь потока, воспринимаемого турбиной;  $\rho$  — плотность воздуха.

В диапазоне значений скорости воздуха 3–11 м/с коэффициент использования мощности ветра составляет приблизительно 0,3, что соответствует удовлетворительному уровню экономичности ветроустановок. Коэффициент 0,6 теоретически недостижим. Высокие скорости ветра приводят к более значительному уменьшению коэффициента использования. Например, при скорости ветра 20 м/с его мощность составляет 80 кВт, но полностью использовать такую мощность генератор не способен. Коэффициент отдачи должен учитывать нестационарность процесса, поэтому должен быть понижен на 2–5 %. Рис. 2 отображает мощность воздушного потока как функцию его скорости. В качестве примера использованы технические характеристики агрегата ВЭУ-М-3/5.

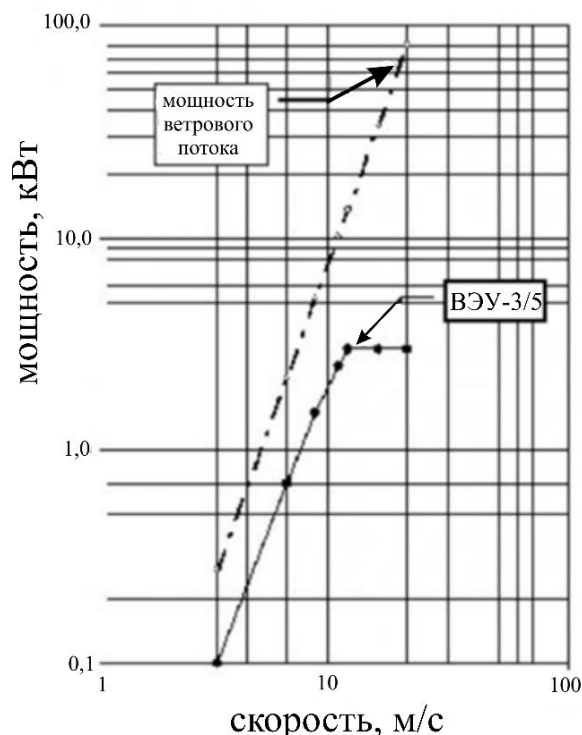


Рис. 2. Зависимость мощности ветрового потока от его скорости

На рабочем блоке ВЭС генерируется трехфазный ток. Случайные отклонения в потреблении нивелируются системой «выпрямитель — аккумулятор» под управлением контроллера расхода энергии. Если скорость ветра составляет 25 м/с и выше, контроллер запускает электромагнитное торможение ротора устройства. Возможность подачи энергии на бытовую технику с напряжением 220 В и частотой 50 Гц осуществляет инвертор. При отсутствии ветра необходимо использовать резервный бензиновый электрогенератор. Изменчивость ветра иллюстрируется графиком плотности распределения его скорости. На нем наглядно представлена повторяемость ветровых режимов, что описано с помощью автокорреляционной функции (рис. 3). Из графика следует, что для ветра характерна сильная несимметричность распределения скорости. Теоретической моделью, отражающей данное описание, выбрано распределение Вейбулла. При этом приняты типичные для крымских ветров значения параметров:  $a \approx 1,7$  — параметр, определяющий отклонение от симметрии; математическое ожидание  $b \approx 7,5$  м/с.

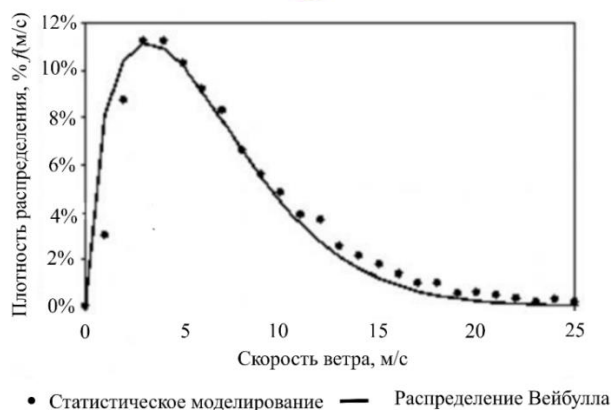


Рис. 3. Плотность распределения скорости ветра

Расчеты мощности ветрогенератора как функции скорости ветра показывают зависимость, близкую к линейной (рис. 4).

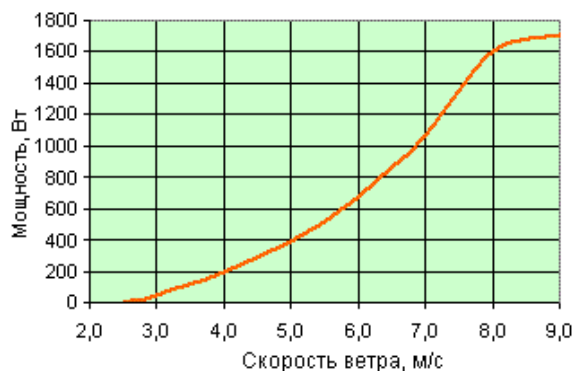


Рис. 4. Зависимость мощности ветрогенератора от скорости ветра

При скорости ветра менее 7,5 м/с мощность пропорциональна этой скорости в кубе. Так, при скорости 4 м/с мощность не превышает 0,2 кВт. Таким образом, при слабом ветре эффективность работы установки уже не определяется его скоростью. Если ветер усиливается, растет роль нелинейных эффектов, зависящих от вязкости и турбулентности. На рис. 5 приведена зависимость энергии ветра от его скорости.

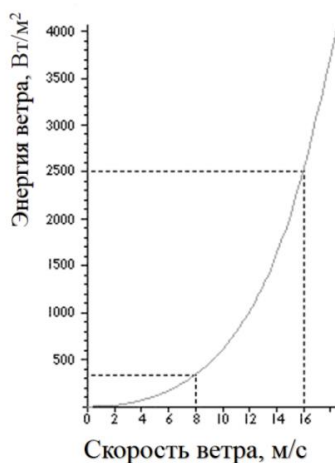


Рис. 5. Зависимость энергии ветра от скорости

Энергию воздушного потока  $E$ , Дж, можно оценивать, как кинетическую энергию совокупности его молекул:

$$E = \frac{m\bar{v}^2}{2}, \quad (1)$$

где  $m$  — масса воздуха, кг;  $\bar{v}$  — средняя скорость воздушного потока, м/с.

Секундная масса движущегося воздуха  $m_c$ , кг/с, рассчитывается по формуле:

$$m_c = \rho \bar{v} S, \quad (2)$$

где  $\rho$  — плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $S$  — площадь поперечного сечения воздушного потока, м<sup>2</sup>.

Подставим (2) в (1) и получим выражение для мощности  $P$ , Вт, развиваемой ветровым потоком:

$$P = \frac{\rho \bar{v}^3 S}{2}. \quad (3)$$

При  $S = 1 \text{ м}^2$  из выражения (3) получим формулу для расчета удельной мощности ветрового потока  $P_{уд}$ , Вт/м<sup>2</sup>:

$$P_{уд} = \frac{\rho \bar{v}^3}{2}.$$

В случае нормальных условий, характеризующихся атмосферным давлением порядка  $10^5$  Па и температурой  $15^\circ \text{C}$ , плотность воздуха равна  $1,23 \text{ кг/м}^3$ . При увлажнении воздуха его плотность несколько понижается, так как молекулярный вес паров воды составляет около  $18 \text{ г/моль}$ . В холодные сезоны плотность потоков возрастает, что приводит к повышению эффективности ВЭС. Так, при скорости около  $4 \text{ км/ч}$  через площадку  $1 \text{ м}^2$  проходит энергия около  $0,7 \text{ Дж}$ . Если скорость потока  $3 \text{ м/с}$ , удельная мощность составит  $(1,23 \cdot 3^3)/2 \approx 5,54 \text{ Вт/м}^2$ , а при скорости  $10 \text{ м/с}$  этот параметр будет равен  $(1,23 \cdot 10^3)/2 = 615 \text{ Вт/м}^2$ . И это в тысячу раз больше, чем при скорости ветра  $1 \text{ м/с}$ , хотя она повысилась только в десять раз. Таким образом, зависимость удельной мощности ветра от скорости потока близка к кубической: если скорость увеличится от  $2$  до  $6 \text{ м/с}$ , удельная мощность возрастает почти в  $30$  раз.

Для оценки мощности, получаемой от ВЭС, нужно использовать параметр отдачи, который, в зависимости от конструкции агрегата, может принимать разные значения. Например, при вертикальном расположении турбин он составляет  $0,25$ , при горизонтальном —  $0,5$ . Условно этот параметр можно считать коэффициентом полезного действия ВЭС.

Целесообразность применения ВЭС можно оценить, как объем инвестиций, приходящийся на  $1 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$  мощности рабочего агрегата. Наглядным эргономическим расчетом является рассмотрение полезной рабочей площади. В этом плане одним из эффективных решений является использование парусных элементов ВЭС. В табл. 1 приведены данные по удельной мощности ВЭС с такими элементами.

Таблица 1

Зависимость удельной мощности ВЭС от скорости воздушного потока

Скорость, м/с	1	3	5	9	11	15	18	21	23
Удельная мощность, Вт/м <sup>2</sup>	1	17	77	477	815	2067	3572	5672	7452

Пороговое значение скорости ветра для горизонтальных ВЭС уменьшается до 4,5 м/с, при этом мощность превышает 250 кВт, а при мощности 100 кВт и меньше значения скорости составляют до 3 м/с. Малые ВЭС мощностью не выше 100 кВт могут работать в автономном режиме. Для обеспечения стационарности и непрерывности необходимы резервные системы, в частности, электростанции, основанные на фотопреобразователях, или тепловые системы на дизтопливе.

ВЭС мощностью 100 кВт и более должны включаться в крупные энергетические комплексы. Так называемые «ветрофермы» (winds-farms) приняты в энергетике европейских стран (Нидерланды, Дания и др.), также в США и Канаде. Суммарная мощность одной такой системы может превышать 1 ГВт.

Как отмечалось выше, нестационарность воздушного потока является одной из важнейших технологических проблем. Сглаживание порывов достигается «мягкими системами аккумуляирования» (soft accumulation systems, SAS), в которых присутствует механическая компонента в виде маховиков и преобразовательная — в виде электролизных, гидравлических и других накопителей.

Интерес представляет «генерация ветра». Так, в Испании участок земли значительной площади в акватории вертикального тягового цилиндра был оснащен полимерной пленкой. Естественный прогрев воздуха под ней приводил к стационарному потоку воздуха в цилиндре, над верхним отверстием которого вращалась горизонтальная крыльчатка-турбина. Определяющим отрицательным фактором явилась дороговизна системы, ВЭС пришлось законсервировать в 2015 г.

В России также расширяется разработка ВЭС. Так, в 1990-х годах запущена испытательная ВЭС «Конвет-1Э», снабженная асинхронным генератором мощностью 2,2 кВт с напряжением 230 В. Также в системе использован индукторный генератор постоянного тока с напряжением 12 В. Двухлопастная турбина вращает ротор генератора, который вырабатывает мощность, позволяющую питать домашние электроприборы. Эта система дешевле традиционных электростанций, применяемых для данных целей, примерно в 1,5 раза, а масса не превышает 0,5 т.

Еще одной важной проблемой является чрезмерная интенсивность ветра, приводящая к поломке агрегатов. В конструкции «Конвет-1Э» использована автоматика системы CYBER.RU, реализующая торможение ротора с лопастями при больших скоростях воздушных потоков. В целом эффективность системы достигла 46 %, что определяет перспективность развития ветровой энергетики. Стартовый порог скорости ветра для совокупности ветродвигателей «Конвет-1Э» составил 4 м/с, тогда как зарубежные агрегаты могут выходить на номинальную мощность только при скорости 6 м/с и более.

В Ростовской области 01.05.2020 введена в эксплуатацию Каменская ВЭС с номинальной мощностью 100 МВт. Начаты поставки на оптовый рынок электрической энергии и мощности (ОРЭМ). Ветроэлектростанция стала вторым завершенным объектом Фонда развития ветроэнергетики в Ростовской области.

С 2020 г. в Ростовской области действует ряд ветроэнергетических установок, смонтированных в Каменске-Шахтинском, Красном Сулине и Гуково. Так, Каменск-Шахтинская ВЭС включает 26 установок производства компании Vestas мощностью 3,8 МВт каждая. Ветропарк построен близ Красносулинской ВЭС мощностью 100 МВт, которая начала поставки на ОРЭМ 01.03.2020. Также в бывших казачьих степях Ростовской области завершено строительство Казачьей ВЭС установленной мощностью 100 МВт. На юге России, таким образом, построена

мощная энергосеть с возможностями резервного электроснабжения, ориентированная на экологически чистые ресурсы.

**Заключение.** Анализ энергоэффективности позволяет сделать заключение, что исследованное направление развития ветроэнергетики в России и, в частности, в Ростовской области, является перспективным и экономически оправданным. По сравнению с тепловыми электростанциями, ветроэлектростанции отличаются меньшим сроком службы и требуют больших инвестиций на единицу мощности, но при нынешних тарифах эта сфера может быть отнесена к безубыточным, что говорит о высокой рентабельности отечественных ВЭС [2] и перспективности развития ветровой электроэнергетики.

#### **Библиографический список**

1. Шевцова, С. В. Анализ зарубежного опыта использования альтернативных видов энергии / С. В. Шевцова, Д. С. Жолудь // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. — 2010. — № 6 (76). — С. 49–53.

2. Грачев, К. С. Лучшие европейские практики для внедрения возобновляемых источников энергии в РФ / К. С. Грачев, С. Г. Шеина // Инженерный вестник Дона : [сайт]. — 2019. — № 5 — URL: [http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_69\\_6y2019\\_Grachev.pdf\\_96aa99b8b7.pdf](http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_69_6y2019_Grachev.pdf_96aa99b8b7.pdf) (дата обращения : 18.12.2020).

3. Рогов, В. Ю. Оценка эффективности развития аэростатной ветроэнергетики в континентальных районах / В. Ю. Рогов // Вестник Иркутского государственного технического университета. — 2013. — № 4 (75). — С. 204–211.

4. European Energy Security Strategy. COM (2014) 330 final. Brussels. 2014. Режим доступа: <https://www.europex.org/eu-legislation/eu-energy-security-strategy/> (Дата обращения 8.12.2020).

*Об авторах:*

**Попова Инна Григорьевна**, доцент кафедры «Физика» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат физико-математических наук, [inna111109@rambler.ru](mailto:inna111109@rambler.ru)

**Кравцов Владислав Борисович**, студент Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [remiron15@gmail.com](mailto:remiron15@gmail.com)

**Камелина Евгения Сергеевна**, студент Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [Vebrena@yandex.ru](mailto:Vebrena@yandex.ru)

**Гребенюк Иван Александрович**, студент Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [grebenyuk.ivan@bk.ru](mailto:grebenyuk.ivan@bk.ru)

*Authors:*

**Popova, Inna G.**, Associate professor, Department of Physics, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, RF, 344003), Cand.Sci., [inna111109@rambler.ru](mailto:inna111109@rambler.ru)

**Kravtsov, Vladislav B.**, Student, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, RF, 344003), [remiron15@gmail.com](mailto:remiron15@gmail.com)

**Kamelina, Evgeniya S.**, Student, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, RF, 344003), [Vebrena@yandex.ru](mailto:Vebrena@yandex.ru)

**Grebenyuk, Ivan A.**, Student, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, RF, 344003), [grebenyuk.ivan@bk.ru](mailto:grebenyuk.ivan@bk.ru)