

*С. Н. Чижма, С. В. Молчанов, А. И. Захаров*

## КРИТЕРИИ ВЫБОРА ТИПА ВЕТРОУСТАНОВОК ДЛЯ МОБИЛЬНЫХ ВЕТРО-СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

*Сформулированы требуемые характеристики ветрогенераторов для мобильных установок, проведена классификация ветроустановок. Проанализированы ветрогенераторы с горизонтальной и вертикальной осью вращения, определены оптимальные типы ветроустановок для применения в условия низких ветровых нагрузок.*

*The authors identify the required characteristics of wind turbines for mobile installations, carry out the classification of wind turbines, analyze wind turbines with a horizontal and a vertical axis of rotation, and define the optimum types of wind turbines for use in conditions of low wind loadings.*

53

**Ключевые слова:** ветрогенератор, мобильный источник электроэнергии, ветровая нагрузка, ветроколесо с вертикальной осью, энергоэффективность.

**Keywords:** wind turbine, mobile power source, wind loading, wind wheel with vertical axis energy efficiency.

### Введение

Мобильные ветро-солнечные электростанции (МВСЭ) являются гибридными системами инверторного накопительного типа, получающими энергию от возобновляемых природных источников (солнце, ветер) с аккумуляцией энергии в батарее аккумуляторов для дальнейшего использования, в данных станциях бензо- или дизель-генераторные установки (БДГУ) с автозапуском используется в качестве резервного источника.

### 1. Общее описание

Мобильные электростанции предназначены для обеспечения электроэнергией нагрузок с питающим напряжением 220 В, 50 Гц переменного тока и 12, 24 или 48 В постоянного тока в полевых условиях, либо в качестве резервно-аварийного, вспомогательного источника.

Мобильные электростанции используются для электропитания аварийных служб, полевых госпиталей, армейских подразделений, геологических партий, строительных и дорожных служб, а также турбаз, кемпингов, фермерских хозяйств и других объектов. При достаточной солнечной инсоляции и ветре станции работают полностью в автономном режиме, без запуска БГУ – с получением энергии только от возобновляемых источников энергии. При полностью заряженной аккумуляторной батарее (АКБ) и отсутствии генерации от ветроэнергетической установки (ВЭУ), солнечной батареи (СБ) и БГУ обеспечивается автономная работа только от АКБ в течение нескольких часов.



Большинство мобильных электростанций не содержат в своем составе ветроустановок. Однако в районах с малой инсоляцией, например на крайнем севере, присутствуют постоянные сильные ветры. По этой причине, ветроэнергетическая составляющая для МВСЭ является целесообразной.

Достоинства ветро-солнечных электростанций заключаются в следующем:

- мобильность и оперативность развертывания в любых погодных условиях;
- возможность стабильности поступления электроэнергии потребителям в минимально необходимом количестве;
- работа полностью в автономном режиме;
- обеспечение постоянства выходного напряжения в автономной электросети;
- отсутствие отклонений и скачков напряжения в сети;
- возможность модернизации электросети под текущие запросы;
- обеспечение экологических нормативов при охране окружающей среды;
- минимализм в обслуживании при длительном сроке эксплуатации станции, который примерно составляет 10 – 15 лет.
- высокий коэффициент полезного действия станции за счет одновременного, оптимального сочетания различных источников своего энергообеспечения – энергии ветра, солнечного излучения и топлива для двигателя внутреннего сгорания;
- наличие встроенного БДГУ позволяет не зависеть от погодных и других природных и климатических условий (продолжительное отсутствие достаточного количества ветра, солнца), при этом расход топлива будет минимальным.

Основным недостатком МВСЭ является их сравнительно небольшая мощность, которая непосредственно зависит от характеристик солнечных панелей, размеров и типа используемого ветрогенератора.

Для МВСЭ существуют несколько характерных требований при выборе типа ветроустановки.

1. Минимально возможные вес и габариты установки.
2. Легкость сборки/разборки/перевозки.
3. Небольшая высота установки ветроколеса, определяемая мобильным характером МВСЭ. На небольшой высоте ветер имеет непостоянный характер, с частыми порывами и сменой направлений.
4. Дешевизна, простота, необслуживаемый самозапуск без автоматики.

Существуют два вида ветрогенераторов: с горизонтальной и с вертикальной осью вращения ветроколеса. В настоящее время в мировом эксплуатируемом парке ветроэнергетических установок (ВЭУ) горизонтально-осевые или так называемые пропеллерные установки составляют более 90%. Для них накоплен огромный опыт проектирования, производства и эксплуатации [1].



## 2. Характеристики ветроустановок

Основной характеристикой ветроустановок выступает коэффициент использования энергии ветра  $C_p$ , по смыслу сходный с коэффициентом полезного действия.

На рисунке 1 приведены зависимости  $C_p$  от быстроходности ветряка  $Z$  [2]. Анализ приведенных кривых показывает, что эффективность наиболее распространенного трехлопастного ветроколеса лишь ненамного выше ветроколеса Дарье. Это дает основание выбирать тип ветроколеса проводить среди установок как с горизонтальной, так и с вертикальной осью вращения.

55

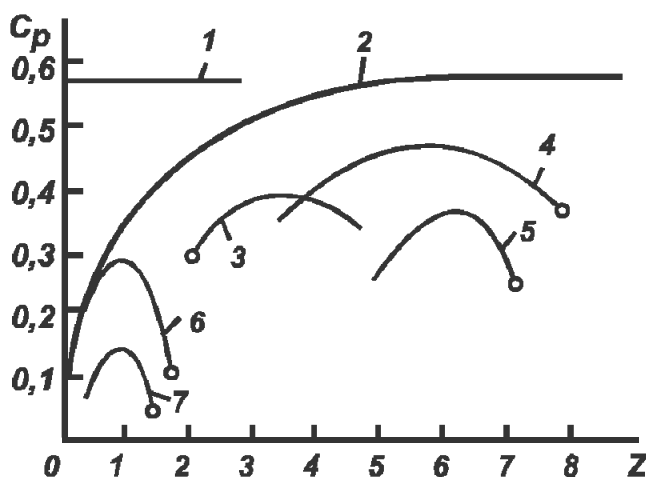


Рис. 1. Зависимость коэффициента использования энергии ветра от быстроходности ветроколеса:

- 1 — критерий Бетца (идеальное ветроколесо); 2 — критерий Глауэрта;
- 3 — трехлопастной ветряк с горизонтальной осью; 4 — двухлопастное ветроколесо;
- 5 — ротор Дарье; 6 — многолопастное ветроколесо с горизонтальной осью;
- 7 — ротор Савониуса

Уязвимым местом ветроколес пропеллерного типа является зависимость работы от направления ветра, что значительно снижает их фактическую эффективность, то есть энергетический КПД с 0,35–0,45 при ветровом потоке строго вдоль оси ветроколеса снижается до 0,15–0,25. При частой смене направления ветра вертикально-осевые ветроэнергетические установки оказываются эффективнее горизонтально-осевых ветроустановок, несмотря на более низкий коэффициент использования мощности ветра [3].

Наибольшая эффективность горизонтальных пропеллерных ВЭУ достижима только при условии обеспечения постоянной коллинеарности оси ветроколеса и направления ветра. Использование такого ВЭУ для мобильной МВСЭ неэффективно, так как высота установки ветро-



колеса в мобильных установках не может быть большой, а в низких слоях воздуха ветер имеет порывистый характер с резким преобладанием направления.

В отличие от ветроколес пропеллерного типа, имеющих горизонтальную ось вращения, вертикально-осевые ветроэнергетические установки (ВО ВЭУ) могут работать при любом направлении ветра и не нуждаются в устройствах ориентации. Именно эта способность является главным достоинством ВО ВЭУ. К этому типу ВЭУ относятся установки с ротором Дарье толкающего типа (за счет феноменов подъемной силы крыла) и ротором Савониуса тянущего типа (за счет дифференциального лобового сопротивления). Существует также ряд комбинированных ветродвигателей на основе роторов Дарье и Савониуса, которые имеют явные ряд преимуществ по сравнению со классическими конструкциями [3].

Основной критерий эффективности для горизонтально-осевых и вертикально-осевых ВУ — это коэффициент использования энергии ветра (КИЭВ или  $C_p$ ). Теоретически доказано, что коэффициент использования энергии ветра идеального ветроколеса горизонтальных пропеллерных и вертикально-осевых установок равен 0,593. По данным [3]  $C_p$  ветроколес тянущего типа (Савониуса) не может быть больше 0,192. Ветроколеса толкающего типа (Дарье) имеют  $C_p$  в основном 0,3–0,4 [4].

Исследования Д. Н. Горелова [5] показали, что для идеального ротора Дарье значение коэффициента  $C_p = 0,72$ , что объясняется принципиальным отличием механизма этого колеса от колеса пропеллерного типа. Крутящий момент ветроколес пропеллерного типа создается подъемными силами, действующими на лопасти. При этом течение среды вокруг лопастей мало отличается от стационарного. Вокруг лопастей ротора Дарье течение среды носит существенно нестационарный характер и аналогично потоку около машущего крыла птиц. Такой нестационарный поток порождает на лопастях силу тяги, которая и создает крутящий аэродинамический эффект.

К настоящему времени достигнутый на горизонтальных пропеллерных ветроэнергетических установках коэффициент использования энергии ветра составляет 0,48. Проведенные экспериментальные исследования российских вертикально-осевых установок показали [1], что значения 0,4–0,45 вполне достижимы. Таким образом, коэффициенты использования энергии ветра горизонтально-осевых пропеллерных и вертикально-осевых ветроэнергетических установок близки.

В силу указанных обстоятельств для МВСЭ представляют интерес ветрогенераторы с вертикальной осью вращения. Установки такого типа отличаются невысокой скоростью вращения и более низким коэффициентом использования энергии ветра, однако имеют ряд достоинств:

- вертикальные роторы без последствий переносят резкие порывы ветра;
- нормально работают в условиях снегопадов и обледенения;



- самостоятельно начинают вращаться при скорости ветра 0,2–0,5 метров в секунду;
- выходят на номинальную мощность при скорости всего 3–4 м/с;
- доступность разнообразных мест установки ветрогенератора: крыши зданий, платформы, осветительные столбы или передвижные бытовки;
- бесшумность движения вращающихся деталей, при любом ветре;
- без флюгерной системы, ВЭУ легко ловит разнонаправленный ветер;
- относительно небольшая рабочая скорость вращения, до 200 оборотов в минуту, продлевает работоспособность всех подшипников механизма, увеличивает срок между обслуживаниями установки;
- минимальное количество движущихся элементов и неподвижно закрепленный внизу генератор установки;
- вертикальная ВЭУ позволяет использовать любой низовой ветер, турбулентность, сквозняк вдоль улицы или между многоэтажками;
- ветроэлектрическая установка удобно располагается в местах, где запрещены высокие строения.

Сегодня вертикально-осевые роторы Савониуса и Дарье различных модификаций применяются только в малых ветроустановках. На мировом рынке ветроэнергетики общее количество моделей вертикально-осевых ветроустановок мощностью до 50 кВт составляет около 35%, а в классах мощности свыше 100 кВт коммерческие вертикально-осевые ветроустановки практически отсутствуют [6].

### 3. Конструкции вертикальных ветрогенераторов

Существует несколько различных конструкций вертикальных ветрогенераторов, каждая из которых обладает своими достоинствами и недостатками (рис. 2).

#### 3.1. Ротор Савониуса

*Ротор Савониуса* ветряка включает две или более лопастей, выполненных в форме полукруга. К достоинствам данной установки можно отнести малый размер, простоту изготовления, относительную бесшумность, хорошую работу при медленном ветре (3–5 м/с), высокий стартовый момент. Данная ветроустановка самая тихая из рассматриваемых и обладает невысоким коэффициентом использования энергии ветра 0,18–0,24 при КПД 17–18% (рис. 3).

Недостатки:

- большая «парусность». Воздействие ветра кренит всю конструкцию, создавая напряжение в оси и выводя из строя подшипник, на котором вращается весь ротор;
- конструкция не способна начать вращаться самостоятельно при наличии двух или трех лопастей, поэтому два таких ротора необходимо закреплять на одной оси одну под другой под углом в 90°.

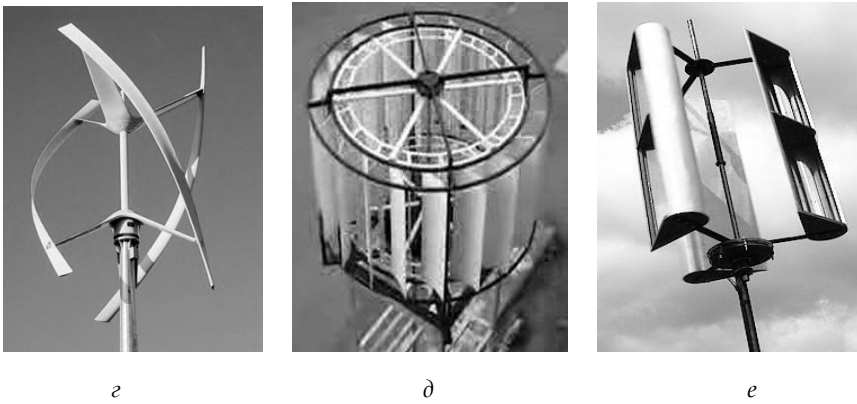
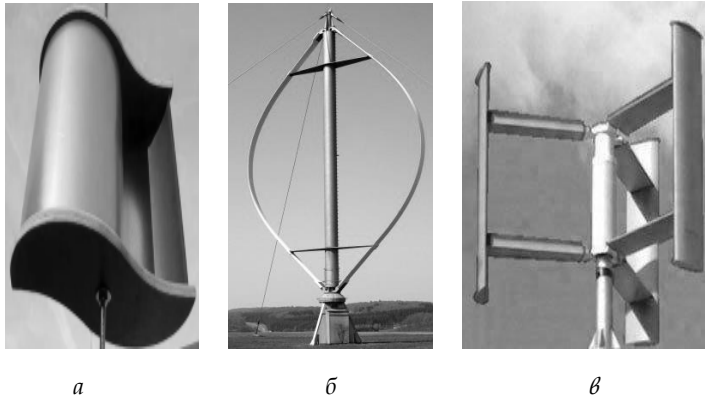


Рис. 2. Внешний вид ветроустановок с роторами различных типов:  
а – Савониуса; б – Дарье; в – Н-образный Дарье; г – геликоидальный;  
д – многолопастной с направляющими шторками; е – ротор Ленца

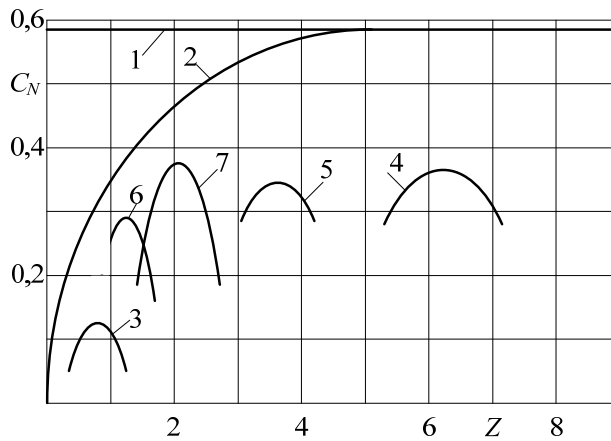


Рис. 3. Расположение мощностных характеристик вертикально-осевых ВУ по быстроходности ( $Z$ ) относительно критериев Бетца (1) и Глауэрта (2):  
3 – ротор Савониуса; 4 – ротор Дарье; 5 – ротор с прямыми крыловыми лопастями NASA0018; 6 – ротор с лопастями KH-6 (ротор Ленца);  
7 – Н-образный ротор Дарье



### 3.2. Ротор Дарье

*Ротор Дарье* представляет собой симметричную конструкцию, состоящую из двух и более аэродинамических крыльев, закрепленных на радиальных балках.

На каждое крыло, движущееся относительно потока, действует подъемная сила, величина которой зависит от угла между векторами скорости потока и мгновенной скорости крыла. Максимального значения подъемная сила достигает при ортогональности данных векторов. Ввиду того что вектор мгновенной скорости крыла циклически изменяется в процессе вращения ротора, момент силы, развиваемый ротором, также является переменным. Поскольку для возникновения подъемной силы необходимо движение крыльев, ротор Дарье характеризуется плохим самозапуском. Самозапуск улучшается в случае применения трех и более лопастей, но и в этом случае требуется предварительный разгон ротора.

Работа ротора Дарье не зависит от направления потока. Следовательно, турбина на его основе не требует устройства ориентации. Характеризуется высоким коэффициентом быстроходности при малых скоростях потока и высоким коэффициентом использования энергии потока: площадь, ометаемая крыльями ротора, может быть достаточно большой.

К достоинствам ротора Дарье можно отнести высокий коэффициент быстроходности при медленном ветре и высокий коэффициент использования энергии ветра. Роторы Дарье не хуже, а иногда даже лучше горизонтально-осевых ВЭУ. Из недостатков ротора Дарье стоит отметить плохой самозапуск, низкую механическую прочность и высокий шум при работе данной ВЭУ.

### 3.3. Н-образный ротор Дарье

Свое дальнейшее развитие схема ротора Дарье получила в более перспективной модификации — роторе Дарье с прямыми вертикальными лопастями, жестко установленными на горизонтальных или наклонных траверсах. Позже эта конструкция стала называться *Н-ротором Дарье*. Ротор состоит из одной или более лопастей аэродинамического профиля.

К достоинствам такого ротора относится высокая технологичность, пониженный уровень шума и полное отсутствием инфразвука. Ветроэнергетические установки этого типа имеют простую конструкцию и характеризуется высокой степенью надежности.

Одним из недостатков Н-ротора является циклическая пульсация величины его вращающего момента за один оборот вращения, обусловленная изменением величины подъемной силы на лопастях в зависимости от их азимутального положения. При этом аэродинамическая подъемная сила, а значит, и вращающий момент лопасти за один оборот изменяются в диапазоне от отрицательного (на наступающем и от-



ступающем участках траектории) до максимального значения (на наветренном и подветренном участках траектории). Такая пульсация вращающего момента приводит к неравномерности скорости вращения и высокому стартовому моменту ротора, что снижает его эффективность.

### 3.4. Ротор Ленца (ротор с крылом незамкнутой формы)

Существует тип Н-образного ротора Дарье с крылом незамкнутой формы (см. рис. 2, *e*), за рубежом получившим название *ротора Ленца*, в России – *ветроколесо с лопастями КН* [8]. Лопасти вертикально-осевых ВУ, рекомендуемые для вертикально-осевых ВУ, имеют крыловую незамкнутую форму профиля (аббревиатура КН) как более простые в изготовлении и достаточно эффективные. В частности, коэффициент использования энергии ветра для ротора с модификацией лопасти КН-6 (см. рис. 3) по результатам исследований достигал  $C_{p\max} \approx 0,3$ . Мощностная характеристика ротора с лопастями КН-6 расположена в области быстроходности между тихоходными ( $Z < 1$ ) и быстроходными ветроколесами ( $Z > 3$ ), что послужило основанием классифицировать ВУ с таким ветроколесом, как новый тип ВУ средней быстроходности. Ветроколесо с лопастями КН-6 самозапускается и работает и при низких скоростях ветра.

Мощностные характеристики [8] вертикально-осевых ВЭУ по быстроходности позволяют сделать выбор типа ветроколеса для мобильной ВЭУ.

### 3.5. Геликоидный ротор

*Геликоидный ротор* – разновидность ротора Дарье, обеспечивающая равномерное вращение. Этот вертикальный ветрогенератор имеет замысловатую форму, но, по сути, это ортогональный ветрогенератор с вертикальной осью, только лопасти у него закручены вдоль несущей оси, что значительно повышает срок службы всей конструкции, так как обеспечивает равномерную нагрузку на подшипник и мачту со всех сторон. Изгиб лопастей по геликоиде позволяет избежать потерь КИЭВ из-за их кривизны.

## Заключение

Существует ряд технических решений, в которых для устранения отдельных недостатков ветроколес предлагается использовать комбинацию двух типов роторов. Например, ученые из Астраханского технического университета предлагают гибридный ветроколес Н-образного Дарье и Савониуса (Н. Д. Шишкин, И. С. Терентьев) [9]. Расчеты показывают, что энергетический КПД для КВО ВЭУ лишь незначительно меньше коэффициента полезной мощности ротора Дарье и составляет порядка 0,36 [10].

В [11] приведены данные о коэффициентах использования ветра различных типов ВЭУ: гибридный ветроколес – трехлопастного Дарье и





Савониуса, выпускаемого фирмой Ecology and Energy (Япония) имеют  $C_p = 0,15$ , гибриды двухлопастного Н-образного ротора Дарье и ротора Савониуса фирмы Tassa (Германия) имеют  $C_p = 0,3$ .

На основании проведенного анализа можно сделать следующий вывод. Вертикально-осевые ветроустановки конструктивно являются более простыми и обладают рядом преимуществ перед горизонтально-осевыми ветроустановками. Однако коэффициент использования мощности ветра и КПД у них несколько ниже, что приводит к увеличению габаритов, а в некоторых случаях и к увеличению материалоемкости.

Вместе с тем при использовании вертикально-осевых ветроустановок в автономном режиме или в качестве резервных источников электроэнергии данный недостаток нивелируется. Кроме того, в этом случае (буферное аккумулирование электроэнергии) можно снизить требования к качеству выходного напряжения и применить упрощенные конструктивные решения задач преобразования ветрового потока в механическую энергию вращения вала (например, нерегулируемые лопасти и т. п.). При этом требуемое качество электроэнергии в канале электроснабжения может быть обеспечено стандартными устройствами преобразования электрической энергии (например, источниками бесперебойного питания типа UPS) с аккумуляторной батареей соответствующей емкости.

Анализ различных типов роторов показывает, что по комплексу требований, предъявляемых к мобильным ВЭУ (коэффициент использования энергии ветра, конструкция, простота сборки/разборки, возможность транспортировки) в наибольшей степени удовлетворяют Н-образный ротор Дарье и ротор Ленца.

#### Список литературы

1. Бабина Л. В. Анализ ветроустановок для электростанций малой мощности // Научный журнал КубГАУ. 2012. № 78(04). С. 1 – 10.
2. Янсон Р. А. Ветроустановки. М., 2007.
3. Шишкин Н. Д., Терентьев И. С. Оценка основных параметров комбинированных вертикально-осевых ветроэнергоустановок для судов и нефтедобывающих платформ // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. 2015. № 2. С. 56 – 63.
4. Твайделл Дж., Уэйр А. Возобновляемые источники энергии. М., 1990.
5. Горелов Д. Н. Энергетические характеристики ротора Дарье // Теплофизика и аэромеханика (обзор). 2010. Т. 17, № 3.
6. Костюков И. Ю., Тарасов С. В. Ретроспектива и перспектива вертикально-осевой ветроэнергетики // Вестник Днепропетровского университета. Сер. ИФНИТ. 2014. № 22. С. 3 – 18.
7. Соломин Е. В. Результаты испытаний и эксплуатации вертикально-осевых ветроэнергетических установок // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2015. № 15. С. 70 – 83.
8. Рожкова Л. Г. Новые формы профилей лопастей вертикально-осевых ветроустановок средней быстроходности : дис. ... канд. техн. наук. Сумы, 2005.
9. Шишкин Н. Д., Терентьев И. С. Оценка основных параметров комбинированных вертикально-осевых ветроэнергоустановок для судов и нефтедобывающих платформ // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. 2015. № 2. С. 56 – 63.



10. Дзедзерский В. А., Тарасов С. В., Костюков И. Ю. Ветроустановки малой мощности. Киев, 2011.

11. Рожкова Л. Г. Вибір типа вітроустановок для умов України // Праці ТДАТУ. 2017. Вип. 15, т. 1. С. 217–225.

#### Об авторах

Сергей Николаевич Чижма — д-р техн. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: chisn@yandex.ru

Сергей Васильевич Молчанов — канд. физ-мат. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: SMolchanov@kantiana.ru

Артем Игоревич Захаров — асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: aizakharov@kantiana.ru

#### The authors

Prof. S. Chizhma, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: chisn@yandex.ru

Dr S. Molchanov, Associate Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: SMolchanov@kantiana.ru

A. Zakharov, PhD Student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: aizakharov@kantiana.ru