



УДК 338.2

*О. В. Боровикова*

## ПРИМЕНЕНИЕ ДИСПЕРСИОННОГО И КОВАРИАЦИОННОГО АНАЛИЗА В УПРАВЛЕНИИ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ

UDC 338.2

*O. V. Baravikova*

## APPLICATION OF ANALYSIS OF VARIANCE AND COVARIANCE IN PRODUCT QUALITY MANAGEMENT

### **Аннотация**

Приведены основные статистические методы, используемые на предприятиях при управлении качеством. Рассмотрен пример применения средств дисперсионного и ковариационного анализа для выявления факторов, оказывающих влияние на качество продукции. Разработаны рекомендации по снижению уровня брака на предприятии.

### **Ключевые слова:**

статистические методы, управление качеством, дисперсионный анализ, ковариационный анализ.

### **Abstract**

The paper shows the main statistical methods which are used in enterprise quality management. An example of using the means of the analysis of variance and covariance is given to identify factors that affect the quality of products. Recommendations have been developed to reduce the level of spoilage at the enterprise.

### **Keywords:**

statistical methods, quality management, analysis of variance, analysis of covariance.

Управление качеством продукции – это область науки, которая с учетом глобализации экономики, повышения конкуренции и динамизма на рынках все чаще выходит на первый план и решения в которой могут стать определяющими жизнеспособность компании в длительной перспективе. Управление качеством охватывает все этапы жизненного цикла продукции, начиная с изучения рынка и заканчивая утилизацией тары. Процесс управления осуществляется циклически и проходит че-

рез четыре основных этапа: контроль, учет, анализ, принятие решений. В современных условиях только постоянный мониторинг результатов деятельности в рамках данных четырех этапов и оперативное принятие управленческих решений могут позволить компании оставаться конкурентоспособной.

Анализ текущей ситуации и принятие управленческих решений предполагает использование определенного круга методов (математических, статистических и др.) для обоснования вы-

бранной стратегии. Если говорить о рекомендациях на уровне государства по использованию статистических методов в управлении качеством, то в Руководстве по статистическим методам применительно к СТБ ISO 9001–2009 [1] указывается на необходимость использования статистических методов, т. к. они «позволяют лучше использовать доступные данные для содействия в принятии решений и тем самым помогают постоянно улучшать качество продукции и процессов для достижения удовлетворенности потребителя». В [1] указаны следующие методы в привязке к области, где они могут использоваться:

- описательная статистика;
- планирование экспериментов;
- проверка гипотез;
- измерительный анализ;
- анализ возможностей процесса;
- регрессионный анализ;
- анализ надежности;
- выборочный контроль;
- моделирование;
- карты статистического контроля процесса;
- статистическое назначение допуска;
- анализ временных рядов [1].

Как видно, список статистических методов, которые рекомендуется применять в управлении качеством, достаточно широк. Рассмотрим подробнее регрессионный анализ, т. к. именно он, на наш взгляд, скрывает в себе широкие возможности по анализу процессов и поддержке принятия решений в области управления качеством.

Суть метода состоит в нахождении функциональной зависимости между исследуемыми переменными, причем одна из переменных выступает в качестве независимой или объясняющей и оказывает влияние на вторую переменную, которую называют зависимой или объясняемой. В управлении качеством в роли объясняемой переменной могут быть использованы доля бракованной

продукции, ее стоимость, доля новой продукции, стоимость продукции с наивысшей категорией качества и др., а в качестве объясняющих переменных – затраты на НИОКР, доля нового оборудования, доля квалифицированных рабочих и т. д. Вышеприведенные распространенные примеры переменных являются количественными. Однако в управлении качеством исследователю чаще необходимо оценить влияние качественных переменных на зависимую. Например, цель исследования может быть сформулирована следующим образом: есть ли различие в показателях качества продукции у различных рабочих смен, или у разного оборудования; влияет ли сортность или марка исходного материала на количество бракованной продукции и т. д. В этом случае для отображения качественной переменной в уравнение регрессии необходимо вводить так называемые фиктивные переменные, причем их количество должно быть на один меньше, чем возможных вариантов значения качественной переменной. Если рассматриваются регрессионные модели, содержащие только качественные объясняющие переменные, то говорят об ANOVA-модели или модели дисперсионного анализа. Если же в модели присутствуют и качественные, и количественные переменные (их называют ковариатами), то говорят о ковариационном анализе (модель ANCOVA).

Рассмотрим применение ANOVA- и ANCOVA-моделей на примере одного из предприятий г. Могилева, которое является производителем пластмассовой упаковки, в первую очередь пластиковых ведер. Поставки продукции осуществляются по всему миру, поэтому вопросы качества, а значит, и конкурентоспособности продукции являются доминирующими. Экспертами было отмечено, что некоторые термопластавтоматы (ТПА), на которых осуществляется литье ведер под давлением, чаще дают сбой и требуют переналадки, а также,

возможно, имеют больший процент бракованной продукции. Также было предложено проанализировать влияние на качество конечной продукции типа цветной полипропиленовой крошки, которая является сырьем для изготовления ведер. В качестве исходных данных были взяты данные по браку за январь–август 2020 г., включающие объем выпуска, шт., процент брака, номер ТПА, на котором было изготовлено изделие, а также тип цветной полипропи-

леновой крошки.

Для устранения эффекта шума из исходных данных были удалены записи по изделиям, которые выпускались на оборудовании, которое запускалось меньше 10 раз за анализируемый период, а также о продукции с редко используемым типом полипропиленовой крошки (менее 5 раз).

Описательная статистика по количественным переменным приведена в табл. 1.

Табл. 1. Описательная статистика

Переменная	Количество	Среднее	Медиана	Мода	Частота моды	Минимум	Максимум
Выпуск, шт.	771	44 415	14 480	5 700	7	582	782 956
Процент брака, %	771	5,77	4,21	4,17	17	0,08	92,7

Средний выпуск изделия за анализируемый период составляет 44 415 шт., половина изделий выпустилась в количестве менее 14 480 шт., а у половины изделий выпуск превысил данное значение. Минимальный выпуск за период составил 582 изделия, максимальный –

782 956 шт. Средний процент брака по исследуемым изделиям составил 5,77 %, причем минимальное значение брака было 0,08 %, а максимальное близко к 100 % и составило 92,7 %.

Что касается ТПА, то они использовались достаточно равномерно (рис. 1).

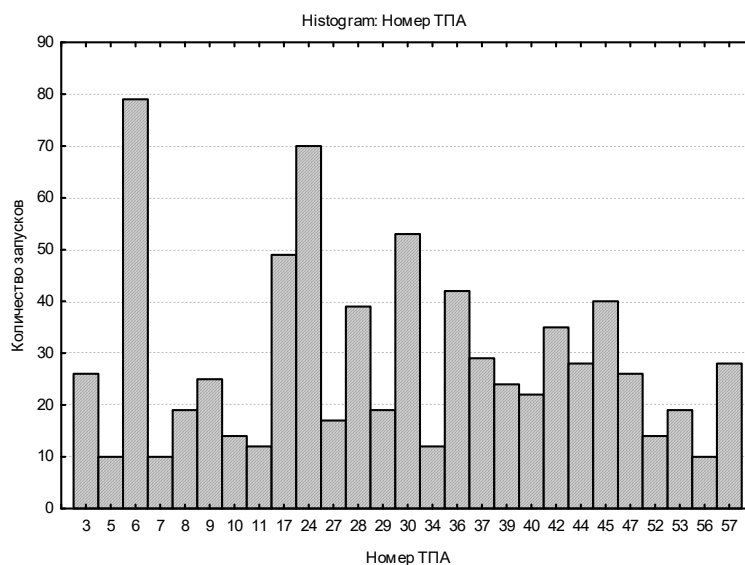


Рис. 1. Гистограмма использования оборудования

Чаще других использовались ТПА № 6 и 24 (79 и 70 раз соответственно).

Средние значения брака для каждого номера ТПА представлены на рис. 2.

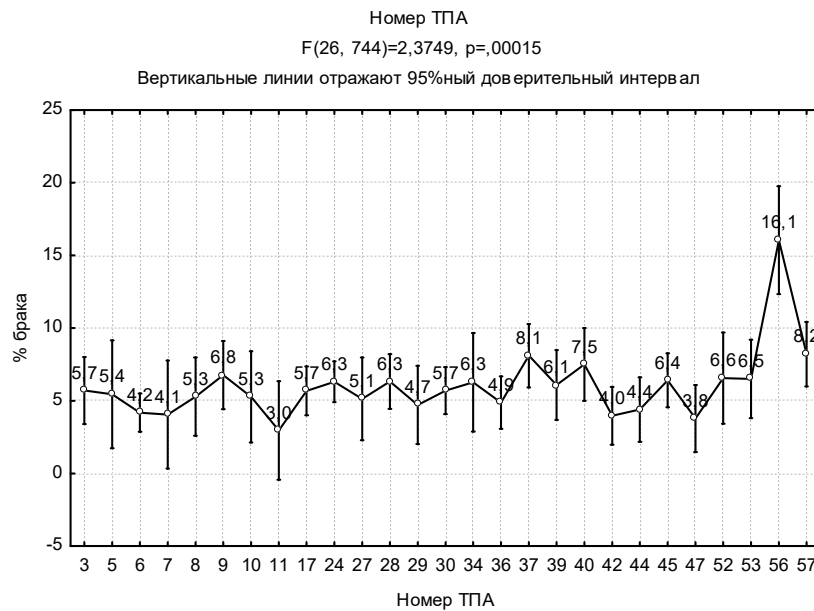


Рис. 2. Средний уровень брака для разных ТПА

На рисунке видно, что наибольший средний уровень брака в 16,1 % наблюдается у ТПА № 56, также высокие значения у ТПА № 57 (8,2 %) и № 37 (8,1 %).

Что касается типа полипропиленовой крошки, то распределение частот ее применения за исследуемый период приведено на рис. 3.

Category	Frequency table: Тип пластика (Spreadsheet исходные данные 11)			
	Count	Cumulative Count	Percent	Cumulative Percent
зеленый 553	6	6	0,77821	0,7782
синий 452	13	19	1,68612	2,4643
белый 102	468	487	60,70039	63,1647
зеленый 528	9	496	1,16732	64,3320
розовый	22	518	2,85344	67,1855
золотой 217	9	527	1,16732	68,3528
синий 416	9	536	1,16732	69,5201
зеленый 529	19	555	2,46433	71,9844
серебряный 108	19	574	2,46433	74,4488
синий 439	9	583	1,16732	75,6161
синий 461	9	592	1,16732	76,7834
черный 702	35	627	4,53956	81,3230
оранжевый 270	9	636	1,16732	82,4903
прозрачный 100	45	681	5,83658	88,3268
желтый 227	15	696	1,94553	90,2724
натуральный 101	6	702	0,77821	91,0506
серый 990021	20	722	2,59403	93,6446
желтый 221	10	732	1,29702	94,9416
серебристый 163	11	743	1,42672	96,3684
серебряный 8222	5	748	0,64851	97,0169
серебр. 8222	23	771	2,98314	100,0000
Missing	0	771	0,00000	100,0000

Рис. 3. Распределение частот использования цветной полипропиленовой крошки

Как и ожидалось, для производства ведер чаще всего используют белую крошку (в исследуемой совокупности частота составила 468 раз или 60,7 %). Следующий по частоте – черный цвет, но его присутствие составляет лишь 4,5 % за анализируемый период.

Количество градаций номера ТПА и типа цветной полипропиленовой крошки равно 27 и 21 варианту соответственно. Известно, что для получения качественной модели регрессии количество наблюдений должно быть не менее семи на один параметр, не считая свободного члена [3]. С учетом правила ввода фиктивных переменных, количество оцениваемых параметров в однофакторных моделях ANOVA будет 26 и 21. Следовательно, требуемое количество наблюдений не менее 182 и 147. Количество наблюдений в выборке составляет 771, что значительно выше ми-

нимально допустимого числа. Это дало возможность строить как однофакторные модели, так и двухфакторную ANOVA-модель.

Таким образом, для оценки влияния типа ТПА на процент брака на предприятии была построена ANOVA-модель зависимости процента брака от номера ТПА. Чтобы проверить ее качество, были оценены значения суммы квадратов отклонений от внутригрупповых средних и общей средней, а также рассчитано значение F-критерия. Выдвигалась гипотеза о том, что средние значения брака для каждого ТПА статистически не различаются между собой. Так как р-значение (рис. 4) меньше уровня значимости (0,05), то можно говорить о том, что с вероятностью 95 % значения средних нельзя считать равными и, следовательно, фактор «номер ТПА» влияет на процент брака.

Тестирование значимости % брака (Spreadsheet исходные данные 111, ANOVA-модель)						
Декомпозиция гипотезы						
Влияние	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p	
Номер ТПА	7690,84	26	295,8015	4,710378	0,000000	
Error	46784,38	745	62,7978			

Рис. 4. Результаты построения ANOVA-модели в ППП Statistica

Также о статистической значимости построенной модели говорит и значимость коэффициента детерминации  $R^2$ .

Целью исследования было оценить не только сам факт влияния фактора на процент брака, но и выяснить, какое именно оборудование дает прирост к результативному фактору. В рамках ис-

следования ANOVA-модели можно построить регрессию с фиктивными переменными, где в качестве фиктивной переменной (со значениями 0 и 1) будут выступать 26 видов исследуемого оборудования, одно из которых выбирается в качестве базовой модели. Результаты приведены на рис. 5.

Parameter Estimates (Spreadsheet исходные данные 111)									
Sigma-restricted parameterization									
Effect	Level of Effect	Column	% брака Param.	% брака Std.Err	% брака t	% брака p	-95,00% Cnf.Lmt	+95,00% Cnf.Lmt	% брака Beta ('
Intercept		1	<b>6,00959</b>	<b>0,253107</b>	<b>23,74333</b>	<b>0,000000</b>	<b>5,51271</b>	<b>6,50648</b>	
Номер ТПА	3	2	-0,29959	1,156761	-0,25899	0,795712	-2,57050	1,97131	-0,0129
Номер ТПА	5	3	-0,56159	1,837538	-0,30562	0,759977	-4,16897	3,04578	-0,0209
Номер ТПА	6	4	<b>-1,82618</b>	<b>0,695244</b>	<b>-2,62667</b>	<b>0,008800</b>	<b>-3,19105</b>	<b>-0,46130</b>	<b>1,1094</b>
Номер ТПА	7	5	-1,95559	1,837538	-1,06425	0,287562	-5,56297	1,65178	-0,0700
Номер ТПА	8	6	-0,72801	1,344424	-0,54151	0,588320	-3,36733	1,91130	-0,0293
Номер ТПА	9	7	0,75561	1,178582	0,64111	0,521646	-1,55814	3,06935	0,0329
Номер ТПА	10	8	-0,73388	1,558885	-0,47077	0,637942	-3,79422	2,32646	-0,0279
Номер ТПА	11	9	-3,05043	1,680615	-1,81507	0,069916	-6,34974	0,24888	-0,1137
Номер ТПА	17	10	-0,32735	0,860279	-0,38051	0,703672	-2,01621	1,36151	-0,0168
Номер ТПА	24	11	0,29941	0,732990	0,40847	0,683045	-1,13957	1,73838	0,0179
Номер ТПА	27	12	-0,87959	1,418655	-0,62002	0,535435	-3,66464	1,90545	-0,0349
Номер ТПА	28	13	0,31502	0,955729	0,32961	0,741784	-1,56122	2,19127	0,0157
Номер ТПА	29	14	-1,29538	1,344424	-0,96352	0,335598	-3,93470	1,34393	-0,0522
Номер ТПА	30	15	-0,31337	0,830096	-0,37751	0,705904	-1,94298	1,31624	-0,0168
Номер ТПА	34	16	0,26457	1,680615	0,15743	0,874952	-3,03474	3,56388	0,0099
Номер ТПА	36	17	-1,13317	0,923444	-1,22711	0,220171	-2,94603	0,67970	-0,0559
Номер ТПА	37	18	2,09213	1,098316	1,90485	0,057185	-0,06404	4,24830	0,0930
Номер ТПА	39	19	0,07874	1,201776	0,06552	0,947778	-2,28054	2,43801	0,0039
Номер ТПА	40	20	1,49450	1,252892	1,19284	0,233313	-0,96513	3,95412	0,0629
Номер ТПА	42	21	<b>-2,03817</b>	<b>1,005230</b>	<b>-2,02756</b>	<b>0,042961</b>	<b>-4,01159</b>	<b>-0,06474</b>	<b>1,0952</b>
Номер ТПА	44	22	-1,61388	1,116733	-1,44518	0,148829	-3,80620	0,57844	-0,0717
Номер ТПА	45	23	0,40216	0,944555	0,42576	0,670404	-1,45215	2,25647	0,0199
Номер ТПА	47	24	-2,23036	1,156761	-1,92811	0,054222	-4,50127	0,04054	-0,0969
Номер ТПА	52	25	0,54898	1,558885	0,35216	0,724818	-2,51136	3,60932	0,0200
Номер ТПА	53	26	0,49620	1,344424	0,36908	0,712175	-2,14312	3,13551	0,0200
Номер ТПА	56	27	<b>0,04241</b>	<b>1,837538</b>	<b>5,46514</b>	<b>0,000000</b>	<b>6,43503</b>	<b>3,64978</b>	<b>1,3625</b>

Рис. 5. Параметры регрессионной модели в рамках анализа ANOVA в ППП Statistica

На рисунке представлены коэффициенты линейного уравнения регрессии при 26 фиктивных переменных. В качестве базы для сравнения был взят ТПА № 57 (его нет в списке). Статистически значимыми признаны коэффициенты при ТПА № 6, 42 и 56, а также свободный член, который в данном случае характеризует среднее влияние на уровень брака базовой модели (на рисунке они выделены полужирным шрифтом). Соответственно, можно сделать вывод, что узкими местами на предприятии в плане формирования качества продукции являются ТПА № 56 и 57, они присутствуют в модели со знаком «+», а значит увеличивают уровень брака. Статистически значимое отрицательное влияние имеют ТПА № 6 и 42. Эксперты подтвердили последние выводы, т. к. за термопластавтоматом № 6 закреплены конкретная пресс-форма и робот IML, что устраняет необходимость в переналадке робота, а это,

в свою очередь, минимизирует уровень брака, получаемый при запуске нового проекта. Что касается ТПА № 42, то в IV квартале 2019 г. на нем был установлен новый комплекс – пресс-форма и робот IML. Это значительно упростило процесс наладки и позволило снизить брак, который возникает по причине неисправности робота IML (потери вакуума, смещение этикетки на конечном изделии и т. п.).

Аналогичный анализ был проведен и по выявлению влияния типа цветной крошки. Модель оказалась статистически незначима, т. е. можно сделать вывод, что тип крошки не оказывал существенного влияния на уровень брака за анализируемый период.

На предприятиях, где используются ТПА для литья под давлением, имеется специфика необходимости переналадки оборудования под новые заказы, а значит, под новые пресс-формы. Это ведет к тому, что, как правило, с увели-

чением объема выпуска уровень брака падает, т. к. специалисты успевают откалибровать оборудование. Данную ги-

потезу подтверждает график рассеяния исходных данных (рис. 6).

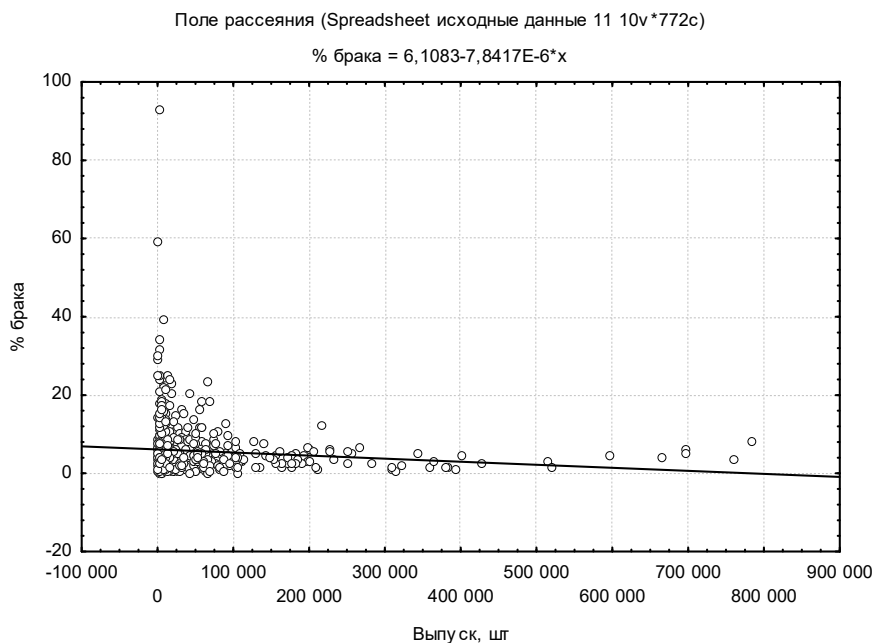


Рис. 6. График зависимости процента брака от объема выпуска

На рисунке видна скученность значений в диапазоне выпуска от 0 до 100 000 шт., а также отрицательный наклон предполагаемой линии регрессии. Была оценена значимость уравнения зависимости, представленного на рисунке. На уровне значимости 5 % уравнение можно считать статистически надежным. Коэффициент корреляции Пирсона между указанными переменными также значим и составляет  $-0,11$ . Таким образом,

линейная связь есть, она отрицательная, т. е. с увеличением одной переменной, вторая уменьшается.

Для учета в модели количественной переменной «объем выпуска» удобно использовать модель ANCOVA – модель ковариационного анализа. В данном случае, помимо качественной переменной «номер ТПА», в модель была введена количественная – «объем выпуска». Результаты анализа приведены на рис. 7.

Тестирование значимости % брака (Spreadsheet исходные данные 111) Ковариационный анализ Декомпозиция гипотезы						
Влияние	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p	
Выпуск, шт	1937,85	1	1937,853	32,14881	0,000000	
Номер ТПА	6676,19	26	256,777	4,25990	0,000000	
Error	44846,53	744	60,278			

Рис. 7. Результаты построения ANCOVA-модели в ППП Statistica

На рисунке видно, что модель получилась статистически значимая – на уровне значимости 5 % подтвердилось влияние объема выпуска на уровень брака, а также подтверждена статистически разница в средних уровнях брака на разных ТПА. В целом, выводы по модели оказались аналогичны ANOVA-модели, но в качестве оборудования, отрицательно влияющего на уровень брака, также было отмечено ТПА № 37.

Таким образом, проведение дисперсионного и ковариационного анализа позволило сделать следующие *выводы*.

1. На предприятии существует обратная связь между уровнем брака и объемом выпуска продукции.

2. Уровень брака напрямую зависит от оборудования, на котором изготавливается изделие; тип цветной полипропиленовой крошки не влияет на процент брака.

3. Статистически значимое отрицательное влияние на уровень брака имеют ТПА № 56, 57 и 37, это оборудование является узким местом на предприятии.

Исходя из обратной связи между уровнем брака и объемом выпуска,

можно рекомендовать отделу логистики распределять задания на машины таким образом, чтобы минимизировать переналадку оборудования и закреплять изготовление одного изделия на конкретном оборудовании.

Что касается мероприятий касательно оборудования, являющегося узким местом, то поскольку за каждым из указанных ТПА закреплено одно изделие, которое постоянно изготавливается на нем, проблема заключается не в сложностях переналадки оборудования, а в техническом состоянии самого робота IML. Следует провести ремонтно-восстановительные работы на этих комплексах, которые могут включать:

- замену вакуумных магистралей;
- ремонт узла транспортировки этикетки;
- восстановление покрытия, наносящего статический заряд;
- замену вакуумного насоса.

Также имеет смысл проведение дополнительного анализа причин возникновения брака на данных ТПА и реализация производственных мероприятий для устранения имеющихся проблем.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **СТБ ISO/TR 10017–2011.** Руководство по статистическим методам применительно к СТБ ISO 9001–2009. – Введ. 2012-07-01. – Минск: Госстандарт; Изд-во стандартов. – 64 с.
2. **Бородич, С. А.** Эконометрика : учебное пособие / С. А. Бородич. – 3-е изд., стер. – Минск: Новое знание, 2006. – 408 с.
3. Эконометрика: учебник для магистров / И. И. Елисеева [и др.]; под ред. И. И. Елисеевой. – Москва: Юрайт, 2012. – 453 с.

*Статья сдана в редакцию 12 октября 2020 года*

**Ольга Валерьевна Боровикова**, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет. E-mail: peklima.olga@gmail.com.

**Olga Valer'evna Baravikova**, senior lecturer, Belarusian-Russian University. E-mail: peklima.olga@gmail.com.